530
-49



Р. Б. БЕКЖОНОВ

АТОМ ЯДРО ВА ЗАРРАЛАР

Раҳим БЕКЖОНОВ

АТОМ, ЯДРО ва ЗАРРАЛАР

УҚИТУВЧИЛАР ВА УРТА МАКТАБ
ЎҚУВЧИЛАРИ УЧУН ҚЎЛЛАНМА

«ЎҚИТУВЧИ» НАШРИЁТИ
Тошкент—1973

Ҳурматли китобхон

Ушбу қўлланма ўзбек тилида ёзилган дастлабки китоблардан бўлганлиги учун камчиликлардан холи эмас. Шу туфайли китоб ҳақидаги танқидий фикр, мулоҳаза ва таклифларингизни бизга юборинг. *Бизнинг адрес: Тошкент, Навоий, 30, «Ўқитувчи» нашриёти, физика-математика адабиёти редакцияси.*

Наганская районная
библиотека
АБОНЕМЕНТ
Инв. № 30484

СЎЗ БОШИ

Атом ўз-ўзидан яхши ҳам эмас, ёмон ҳам эмас. Гап атом кимнинг қўлида ва қандай мақсадларга хизмат қилишига боғлиқ. Атом тўғрисидаги билимларни инсоният учун фойдали ёки катта зарарли мақсадларда ишлатиш мумкин.

Олимлар, модда сирларининг ич-ичига кириб бориб, фақат ўзларининг қизиқувчанлигини қаноатлантирибгина қолмай, балки инсонни табиат билан курашда кучлироқ қилишга ҳам интилдилар. Радиоактив изотоплар инсон кўп қиррали фаолиятининг барча соҳаларида унга ёрдам бермоқда.

Атом толиқмас меҳнаткаш ҳам бўла олади. Газета ёки китобни очинг, радио тингланг — кўзга кўринмас атомларнинг фабрика ва заводларда, далалар ва лабораторияларда, электростанциялар ва денгиз кемаларида меҳнат қилаётганлигини кўрсатувчи мисолларни ўқийсиз ва эшитасиз.

Атом бизнинг кундалик ҳаётимизга кириб бормоқда. Унинг одамларга келтира оладиган барча қимматли хусусиятларини қабул қилишга биз тайёрмизми?

Муаллифга ўрта мактабнинг юқори синф ўқувчилари билан учрашганда уларнинг атом, ядро ва изотоплар тўғрисидаги билимлари анча чегараланган эканлиги маълум бўлиб қолди. Албатта, ўқувчиларнинг ҳаммаси ҳам физик бўлавермайди, лекин, шунга қарамай, ҳозир ҳар бир инсон физикадан маълум даражадаги билимга эга бўлиши лозим.

Ҳозир ҳатто қуйи синф ўқувчиси ҳам чўнтак фонарининг батареяси, штепсель розеткаси ва трансформатор подстанцияси орасидаги фарқнинг мазмунини тушунади. Ўрта маълумотли киши вольт, ампер ва бошқа кўпгина тушунчаларни яхши билади, аммо қўлидаги соатининг ёзувлари баъзи бир моддаларнинг радиоактивлиги натижасида шуълаланиб тургани ҳолда кўпинча, «радиоактивлик» деган сўздан чўчийди.

Асримизни атом асри деб бежиз айтилмаган. Атом бизнинг кундалик ҳаётимизга борган сари кўпроқ кириб бормоқда. Шунинг учун ҳам ҳар бир совет кишиси атом ҳодисалари тўғрисида ҳеч бўлмаганда умумий тушунчаларга эга бўлиши керак, чунки бундан сўнг ядро нурланишлари ва атом энергияси тинчлик мақсадларида тобора кўпроқ татбиқ қилинади.

Атомлар дунёси, атом ядролари ва микродунёнинг мураккаб қонунлари тўғрисида оммабоп китоблар, хусусан ўзбек тилида жуда оз ёзилган. Қўлингиздаги китоб атом ва ядро физикаси ҳозирги замон ютуқлари, атом энергиясидан тинчлик мақсадларида фойдаланишнинг ҳозирги замон усуллари ҳамда «миттн» зарралар дунёси вакилларининг ҳозирги замон тушунчаларн ҳақида ўрта мактаб ўқувчилари ва ўқитувчиларига қўлланма (хрестоматия) сифатида фойдаланиш учун ёзилган.

I боб

АТОМ ФИЗИКАСИ

1-§. АТОМ ВА УНИНГ ЭНЕРГИЯСИ ТАРИХИДАН

1903 йилда француз физиги Пьер Кюри радиоактивликни кашф этганлиги учун Нобель мукофотини ола туриб, бундай деган эди:

«Жиноятчи қўлида радий бениҳоят хатарли бир нарсага айланиши мумкинлигини олдиндан кўриш унча қийин эмас, шунинг учун ўринли бир савол туғиладн: табнат сирларини билиш инсоният учун ҳақиқатан ҳам фойда келтирадими, инсоният улардан яхшилик йўлида фойдалана олиш даражасига ўсиб етганми ёки бу билимлар унга фақат зарар келтирадими?» Пьер Кюри бу саволга ўзи қуйидагича жавоб берган эди: «Мен янги кашфиётлардан инсоният эзгулик орттиради деб ўйлайдиган кишилар жумласиданман».

Альберт Эйнштейн йигирманчи йилларда атом техникаси ҳақидаги суҳбат вақтида бутун умидини «келажак авлоднинг юксак маънавий савиясига» боғлаган эди.

1939 йили Парижда Жолио Кюри бошчилигидаги тўрт француз олими энергия манбаи сифатида фойдаланиладиган атом батареясига патент олган эди. Шундай қилиб, жаҳондаги энг биринчи атом қурилмаси ажал учун эмас ва ҳатто бойлик орттириш учун ҳам эмас, балки ҳаёт учун лойиҳаланган эди. Фақат ҳаётни ишлаб чиқариш учун! Жолио Кюри раҳбарлигида қирқинчи йиллар охирида қурилган атом реакторининг тўғридан тўғри ҳаёт — юнонча «зоэ» («ҳаёт») сўзи билан аталганлиги бежиз эмас, албатта. Кюри атайлаб бу номни бергани турган гап. Атом васвасаси авж олдирилган бир пайтда янги энергиянинг тинчлик йўлида ишлайдиган генератори учун бундан ҳам дурустроқ ном ўйлаб топиш мумкин эмас эди.

Хиросима фожиаси рўй берган кунни кимдир «Альберт Эйнштейннинг қора куни» деб атаган. Айтишларига қараганда ҳозирги замон физикасининг буюк устози ўша куни ўз хонасида қўллари билан чаккасини қисиб ўтирган экан... Агар шу гап рост бўлса, буюк олимнинг ўша куни ўзининг бундан қирқ йил муқаддам кашф этган машҳур физика қонуни ҳақида қайта-қайта бош қотирган бўлишини тасаввур этиш қийин эмас. Бу қонунга биноан модда бағрида жуда улкан энергия запаслари яшириниб ётган бўлиб, унинг тўлиқ энергияси олинган модда

ноб тадқиқотлари ўта ярамас, инсонга зид равишда ташкил этилган жамият туфайли кишилик бахт-саодати учун эмас, аксинча унинг зарарнга ишлатила бошланди. Орадан кўп ўтмай олимларнинг ўзлари ҳам бу аччиқ ҳақиқатнинг бевосита шоҳидлари бўлдилар.

Шундан кейин Америка Қўшма Штатлари қўлига бомба тайёрлаб берган кишилар, ўз ихтироларига ўзлари қарши чиқа бошладилар. Лекин бу гал олимлар, ҳатто Эйнштейн овозига ҳам қулоқ солмадилар.

Атом бомбасининг қўлланилишига қарши исён кўтариб чиққан олимлар орасида энг биринчи атом бомбасини яратган ва уни синовдан ўтказган Энрико Ферми ҳам бор эди. Шу воқеалардан бир оз кейин Ферми бундай деган эди: «Эҳтимол, энди омад кетар...»

Гарчи энди Альберт Эйнштейн ҳамда Энрико Ферми ҳаётдан аллақачоноқ кўз юмиб кетган бўлсалар ҳам улар иштирокида юз берган фожиа ҳали ҳам давом этмоқда. Бу фожиа Хиросима билан барҳам топгани йўқ.

Лекин Хиросима фожиаси мутлақо такрорланмаслиги керак. Бутун жаҳон диққат-эътибори КПСС XXII съезди — коммунизм қурувчилари съезди ўтаётган Кремлдаги Советлар саройига қаратилган кезда тинч меҳнат кишилари кўп ютуқлар қаторида 1954 йилнинг 27 майидаёқ совет фани томонидан қўлга киритилган ажойиб муваффақиятни зўр мамнуният билан эсга олдилар. Чунки айни шу куни дунёда биринчи марта атом электр станцнясн ишга туширилган эди. Ернинг дастлабки сунъий йўлдошларининг учирилиши космосни ўзлаштирнш даврини бошлаб берган бўлса, мазкур станцнянинг ишга тушнрилиши атом асрини бошлаб берди. Атом электр станцияси келажакка бўлган ишонч тимсолн, ҳаётнинг ўлим устидан, яратувчиликнинг бузувчилик, вайронгарчилик устидан ғолиб чиқишини кўрсатувчи ишонч мужассамидир. Шунинг учун бундай станция биринчи галда улуғ Ватанимиз тупроғида бизлар, яъни совет кишилари томонидан қурилишн лозим эди. Ҳақиқатда ҳам худди шундай бўлди. Бунда ҳеч қандай тасодифийлик йўқ! Башарият тарихида биринчи марта қурнлган бу атом электр станциясини ўз кўзи билан кўрган киши яратувчи инсоннинг ақл-заковатига таҳсин ўқиб, шундай дейиши турган гап.

Йўқ, ҳар ҳолда энди турмушдан бахт кетмайди. Турмуш илгаригига қараганда бахтлироқ бўлади. Бу нарса жуда тез рўёбга чиқади, чунки атом ҳозирги кундаёқ инсон бахт-саодатига хизмат қилмоқда.

2-§. МОДДА ТУЗИЛИШИ

Хўш, шундай қудратга эга бўлган модда қандай тузилган экан? Дунё ҳамиша ҳаракатланувчи атомлардан тузилганлигини қадим замонлардаёқ юнон файласуфларидан Левкип билан

Демокрит айтган эдилар. Олимларнинг тадқиқотлари туфайли теварак-атрофимизни қуршаб турган дунёнинг тузилишини билиб олдик. Ҳамма мавжуд моддалар майда-майда зарралардан — атомлардан таркиб топган.

Атом аслида юнонча сўз бўлиб, «бўлинмас» деган маънони билдиради. Атомлар ниҳоят кичик зарралардир. Бир сантиметр узунликдаги чизиққа қатор қилиб терилса, юз миллионга яқин атом жойлашади. Башарти, бир грамм темирдаги атомларни Ер шарининг бутун сиртн бўйлаб бир текисда тақсимласак, Ернинг ҳар бир квадрат сантиметр сиртида деярли 2000 темир атоми жойлашарди.

Атомнинг оғирлигн ҳам назарга илинмас даражададир. Масалан, битта олтингугурт атоми 0,000 000 000 000 000 000 000 05 граммга яқин. Олимлар атомнинг оғирлигини аниқлаш учун нисбий атом оғирлигн деб аталган ўлчамдан фойдаланишга келишилган, яъни айни элемент атоми оғирлигини шартли равишда бир деб қабул қилнигган энг енгил атомнинг (водород атомининг)* оғирлиги билан солиштирадиган бўлдилар. Масалан, табиий олтиннинг ҳар бир атоми водород атомидан 197 марта оғирроқ. Демак, олтиннинг атом оғирлигн 197 га баравардир.

Хўш, дунёда неча хил атом бор? Еки, бошқача қилиб айтганда, дунёдаги моддалар қандай химиявий элементлардан таркиб топган? Атом оғирлиги ва унинг химиявий хусусиятлари ўзаро қандай боғланган?

Бу саволларга машҳур рус олими Менделеев ўтган асрнинг етмишинчи йилларидаёқ жавоб берган эди. У элементларнинг хоссаларн атом оғирлигига боғлиқ деган хулосага келди.

Д. И. Менделеев атом оғирликларининг ошиб боришига қараб химиявий элементлар системасини тузди. Маълум даврлардан сўнг хоссаларн бир-бирига жуда ўхшаш элементлар учрашини аниқлади. Буни у даврий қонун деб атади ва элементларнинг хоссалари уларнинг атом оғирликларига даврий равишда боғлиқдир деган хулосага келди.

Элементлар даврий системасининг ҳозирги вақтдаги кўринишига бир назар ташланг. Бу системанинг ҳар бир катагида биттадан элемент бор. Менделеев жадвалида элементларнинг ҳар бир вертикал устуни группа ҳосил қилади. Бундай группалар ҳаммасн бўлиб тўққизта (тўққизинчиси — нолинчи группа деб аталади). Ҳар бир группанинг элементлари, масалан, литий, натрий, калий, рубидий ва церий — бир-бирига жуда ўхшашдир. Водород атомининг оғирлиги —1, литийники —7, натрийники —23, калийники —39 га тенг ва ҳоказо. Бериллий, магний, кальций ва бошқа элементлар ҳам ўзаро ўхшашдир. Уларнинг хоссалари бир группадан иккинчи группага ўтишда қонуний ўзгаради. Шунинг учун ҳам элементнинг даврий систе-

---

* Янада аниқроқ қилиб айтганда, атом оғирлигининг бирлиги қилиб углерод атомининг $^1/_{12}$ оғирлиги қабул қилинган.

массаси ва ёруғлик тезлиги квадратининг кўпайтмасига тенг! У бу қонуннинг лабораторияда ёки мавҳум космик миқёсда эмас, балки ишлаб чиқариш тарзида ва бевосита Ернинг ўзида (Хиросима устида) даҳшатли суратда тасдиқ этилганлиги ҳақида ўйлаган бўлиши мумкин.

Бироқ олимлар томонидан кашф этилган табиат қонунлари улар ўйлаб **топган қонунлар эмас.**

Дарвоқе, тўпларнинг оғзи осмонга қаратиб отилишига қарамай, ҳамма снарядларнинг ҳамиша ерга қайтиб тушишига Ньютон айбдор эмас-ку, ахир. Ньютон массаларнинг тортилиш қонунини жўрттага яратгани йўқ, у бор-йўғи табиатда мавжуд қонуниятни бошқалардан олдин пайқаб олди, холос. Худди шунингдек, Попов кашф этган радио алоқа принциплари баъзи бир ташвиқотчилар учун кишилар онги ва қалбини куракда турмайдиган ёлғон-яшиқлар, бемаъни гаплар билан тинимсиз тирнаб азоблашга имкон туғдириб бераётганлигига генинал олим шахсан айбдор эмас-ку, радио тўлқинлари улар гарданига нималар юкланаётганлигидан батамом бехабардир.

1938 йилнинг охирида немис физикларидан Ган билан Штрассманлар уранинг парчаланишини кашф этдилар. Бироқ ҳар икки олим нимани кашф этиб қўйганлигига тушунолмай ўзлари ҳам ҳайрон, бир-бирларига савол назари билан қараб, аниқланган фактга қандай маъно беришни билолмай, елкаларини қисганча турар эдилар; улар жуда улкан энергияни ажратиб олишга имкон берадиган янги физик процессни кашф этдик, деган фикрни хаёлларига келтиришга ҳам журъат этолмадилар. Гитлерчилар таъқибидан қочиб, Данияда яшаган Лиза Майтнер билан Отто Фриш Ган ўтказган тажрибаларини талқин қилиб, айни процессни изоҳловчи янги термин — уранинг бўлиниши терминини биринчи марта таклиф этиб чиқдилар.

Нильс Бор 1939 йилда Америка Қўшма Штатларига йўл олган вақтидаёқ дунёда қандай гайри одатий воқеа рўй берганини тушуниб улгурган эди. Немис физикларининг уранни парчалашга муваффақ бўлганликларини ўша пайтда ёлғиз Бор билар эди, холос. Олим томонидан келтирилган бу хабар физикларнинг ақл-идрокини батамом банд этиб олди. Италия фашизми таъқибида АҚШ га қочиб келган Энрико Ферми ана шу хабардан сўнг тўққиз кун ўтгач, немис физиклари тажрибаларини такрорлаб, уран ядроларининг парчаланишидан жуда кўп соҳаларда фойдаланиш мумкин деган тахминни яна бир марта тасдиқлади. Айни вақтда Парижда Фредерик Жолио Кюри ҳам худди шундай натижа олди. Бор билан Уиллер шу заҳотиёқ янги ҳодисанинг назариясини ишлаб чиқаришга киришиб кетдилар.

Совет физикларидан Френкель, Харитон ҳамда Зельдович уранинг парчаланиш пайтида рўй берадиган занжирли реакцияни ҳисоблаш устида иш олиб бордилар.

1939 йилда Америкада олимлар икки гуруҳга: гумончилар ва башоратчиларга бўлинди. Олимларнинг баъзилари энергия-

нинг янги манбаи топилганига ишонмасдилар, уран техника дарвозасини қоқаётганлигини эшитмасдилар. Баъзилари эса бунга ишонар ва ураннинг тарақ-туруқини эшитардилар. Фашизм оёқ ости қилган, таҳқирлаган Европанинг «ўгай» фарзандлари — атоқли физик антифашистларнинг деярли ҳаммаси ана шу башоратчилар қаторида эди.

Германия фашистлари ҳам бу кашфиётга ўзларича баҳо бердилар. Гитлернинг Ган билан Штрассман тажрибаларини давом эттиришга икки юз атоқли физикни сафарбар этиш тўғрисида буйруқ берганлиги ҳақидаги хабар океан оша Америкага ҳам етиб келди.

Ана шундан кейин фан тарихида, эҳтимол, ҳеч учрамаган воқеа рўй берди: Италия, Венгрия, Дания ва Германияда яшаб турган, аммо фашизм ва урушга чексиз нафрат ҳисси туфайли бирлашган муҳожир олимларнинг интернационал группаси гитлерчи олимларга мураккаб масалаларга онд тайёр жавоб етказиб бермаслик мақсадида ўз илмий тадқиқот натижаларини бундан буён матбуотда эълон қилмасликка қарор қилдилар. Фашизмнинг қурбони ва душмани бўлган бу олимларнинг сезгирлигига ҳали тарих муносиб тарзда баҳо беради, албатта. Бироқ тарих бу олимлар гуманизмининг фожиали калтабинлигини ҳам қайд этиб ўтди: улар ўша даврда атом қуролини ишончсиз хоинона қўлга топшираётганликларини, шу сабабдан вақт ўтиши билан бу даҳшатли қурол фашизмни бир четда қолдириб, бутун жаҳонга, маданиятга таҳдид солажагини тушунмас эдилар.

Ўша пайтларда Америка ҳарбийлари уран масаласи ҳақида ҳеч бир нарса билмасдилар. Шунинг учун фашизмга қарши нафрати билан машҳур бўлган президент Рузвельтни ишонтириш лозим эди. Президент кимнинг илмий далилларини сўзсиз қабул этаркин, деган савол туғилди. Ҳамма олимлар маслаҳатлашиб, Эйнштейнга мурожаат қилишга қарор қилдилар.

Ҳозирги замон физика фанининг устози Эйнштейн Хиросима фожиаси куни ўзининг бундан олдин Рузвельтга ёзган хатини пушаймон-алам билан эслаши мумкин эди. У ўз хатида энергиянинг янги топилган манбаи ҳақида, келажакда яратиладиган атом бомбасининг вайронгарчилик қудрати ҳақида ёзган эди. У илмий далиллар билан президентни ядро тадқиқотчиларининг ҳатти-ҳаракатини қўллаб-қувватлашга кўндира олди. Рузвельт урушнинг охирини кўролмай вафот этиб кетди. Унинг ўлими билан бирга Оқ уйдан фашизмга нафрат ҳисси ҳам кўтарилди. Афсуски бошланган иш поёнига етиб қолган эди. Шундан кейин амалда рўй бера бошлаган воқеалар — Хиросима фожиаси, «совуқ уруш» сиёсати ва бошқа талай воқеалар инсоният бошига оғир кулфатлар солди.

Тарих тақозоси билан шундай бўлиб чиқдики, янги кашф этилган олов кишиларни иситиш ўрнига, дастлабига куйдириб қанча-қанча мусибат келтирди. Шундай бўлдики, аввало атомнинг ёвуз кучлари ишга солинди. Ажойиб олимларнинг олижа-

мадаги ўрнини билган ҳолда унинг асосий хоссаларини олдиндан айтиб бериш мумкин.

Биринчи ўринда водород, учинчи — литий, ўн биринчи ўринда натрий ва бошқалар бир устунда жойлашган. Бериллий — тўртинчи, магний — ўн иккинчи, кальций — йигирманчи ва бошқа элементлар кейинги устунда жойлашган ва ҳоказо. Элементлар даврий системасида турган ўринни кўрсатувчи рақамлар — атом номери деб аталади. Хоссалари билан тўғри келадиган элементлар бўлмаганлиги учун баъзи катаклар ўз вақтида бўш қолдирилган ва ҳатто бу элементларнинг хоссалари олдиндан айтиб қўйилган. Фаннинг тобора ривожланиши Д. И. Менделеевнинг фикрини тасдиқлади.

Даврий системада ҳар бир катакда биттадан элемент бор. Катакнинг тепасида элементнинг номери ва шартли белгиси, остида эса элементнинг номи ва унинг атом оғирлиги кўрсатилган бўлади.

Оламни ташкил этган ҳамма моддалар даврий системадаги элементлардан таркиб топгандир. Ҳозир фанда 105 та элемент маълум. Бироқ қўшимча равишда топилган янги элементлар махсус асбоб — қурилмалар ёрдамида сунъий йўл билан ҳосил қилинган бўлиб, табиат қучоғида соф ҳолда деярли учрамайди.

3-§. АТОМ СПЕКТРЛАРИДАГИ ҚОНУНИЯТЛАР

Ҳар бир атом манфий электронлар билан мусбат зарядли ядродан таркиб топган. Атом электр зарядли зарраларнинг мураккаб системасидир. Атомни тузилиши жиҳатидан Қуёш системасига ўхшатиш мумкин. Атомнинг марказида атом ядроси жойлашган, ядро атрофида эса унинг ҳажмига қараганда жуда катта масофада, секундига тахминан 200 *км* тезлик билан моддий зарралар — электронлар ҳаракат қилади.

Ядронинг ҳажми атом ҳажмидан тахминан 100 000 марта кичик. Атомнинг массаси унинг ядросида тўпланган. Атом ядроларининг зичлиги тахминан бир хил бўлиб, ядро моддасининг бир куб сантиметри қарийб 100 миллион тоннага тенг. Ядро бир бутун, бўлинмас элементар зарра эмас, у ўз навбатида, зарядсиз зарралар — нейтронлар билан мусбат зарядли зарралар — протонлардан таркиб топган. Умуман, ядронинг электр заряди мусбатдир.

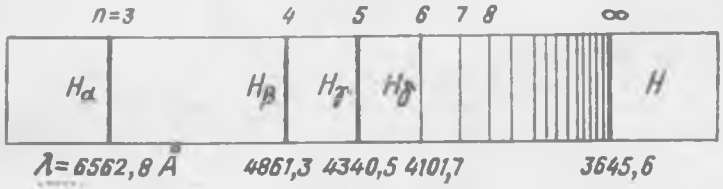
Ядро атрофидаги электронларнинг ядрога нисбатан оғирлиги деярли бўлмайди. Қуёш системасида ҳам худди шунга ўхшаш ҳолни кўрамиз: планеталар массаси Қуёш массасига қараганда жуда кичикдир.

Масалан, электрон массаси протон массасидан, яъни энг оддий химиявий элемент — водород ядросидан 1836 марта кичикдир. Ҳар бир атомдаги электронлар сони ядродаги мусбат зарядлар сонига, яъни протонлар сонига тенг. Бундан келиб чиқадики, атом нейтрал зарра экан.

Маълумки, манфий ва мусбат зарралар бир-бирига тортилади, лекин улар қўшилиб кетмайди. Бунинг сабаби шундаки, электронлар жуда катта тезлик билан айланма ҳаракат қилиб, ядродан қочишга интилади, яъни тортишиш кучи билан марказдан қочирма куч ўзаро мувозанатлашади. Шу туфайли электронлар ядро атрофида ҳамиша муайян масофада ҳаракат қилади.

Электронлар ядро атрофида қобиқларда жойлашган бўлади. Энг оддий атом водород атомидир. Оддий водороднинг атом ядроси биргина протондан иборат бўлиб (атом оғирлиги 1), унинг атрофида эса битта электрон ҳаракатланади, хром атомининг ядросида эса 24 та протон ва 28 та нейтрон бор. Бу элементнинг қобиқларида 24 та электрон айланади.

Хўш, атом ядро ҳамда уни қуршаб олган электронлардан ташкил топган экан, атом ичида электронлар қандай тақсимланган? Олимлар бу саволга жавоб топиш учун сийраклаштирилган газ атомлари ёки металл буглари чиқарадиган нурлар спектрини ўргандилар. Маълумки, оқ нур мураккаб нур бўлиб, энг қисқа тўлқинли бинафша рангдан то энг узун тўлқинли қизил ранггача бўлган ҳамма рангларни ўз ичига олади. Аммо, уйғонган атом ҳолатидаги элемент спектри оқ нур спектридан фарқ қилади. Уйғонган атомдан чиқаётган нурлар бир-биридан қора йўллар билан ажралган чизиқлар тўплами (сериясн)дан иборат бўлиб, оқ нур спектрига ҳеч ўхшамайди. Бу спектрлар чизиқли ёки йўл-йўл спектрлар деб аталади. Атом чиқараётган нур спектрига қараб, уни қайси элемент атоми чиқараётганини билиб олиб мумкин.



1-расм. Атомар водород Бальмер сериясининг диаграммаси (H — узлуксиз спектр соҳаси).

1-расмда водород атомининг кўзга кўринадиган нур чизиқларидан ташкил топган спектри кўрсатилган. Бу чизиқлар тўпламини Бальмер сериясн деб аталган. Маълумки, спектрал чизиқлар маълум тартибда жойлашган бўлади. Чизиқлар орасидаги масофа қонуний равишда узун тўлқинлардан қисқа тўлқинлар томон борган сари камая боради. Бу қонуният атом тузилишини ўрганишда катта аҳамиятга эга бўлди.

1885 йилда биринчи бўлиб швейцариялик физик Бальмер водород атоми чизиқлари сериясининг тўлқин узунликлари қуйидаги формула билан ифодаланишини кўрсатди:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}. \qquad (1)$$

Частоталар учун бу формулани $\left(\nu = \frac{c}{\lambda}\right)$ қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 3, 4, 5, \ldots) \qquad (2)$$

бунда

R — Ридберг доимийси бўлиб, у $4/\lambda_0$ га тенг. ($R = 2{,}07 \cdot 10^{16}$ *сек*$^{-1}$).

(2) формула каби (1) формула ҳам Бальмер формуласидир, унга тегишли бўлган спектр чизиқлари тўпламини Бальмер сериясн деб юритилади. Кейинги тадқиқотлар водород спектрида яна бир неча спектрал серияларборлигини кўрсатди. Бу сериялар чизиқлари ҳам (2) формулага асосан бўлади:

Лайман сериясн

$$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 2, 3, 4, \ldots)$$

Пашен сериясн

$$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 4, 5, 6, 7, \ldots)$$

Брэкет сериясн

$$\nu = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 5, 6, 7, \ldots)$$

Пфунд сериясн

$$\nu = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 6, 7, 8, \ldots).$$

4-§. АТОМНИНГ ЭНЕРГЕТИК САТҲЛАРИ

Водород атоми ядроси атрофида битта электрон ҳаракатланади, у содда спектрга эга бўлган энг оддий атом эканлигидан олимлар аввало шу атомнинг тузилишини ўрганишга ҳаракат қилдилар. Улар бошқа мураккаброқ атомларни ўрганиш шундан кейин осонлашади деб ўйлардилар.

Атомларга хос хусусиятларни биринчи бўлиб даниялик машҳур физик Н. Бор текширишга ҳаракат қилди. Н. Бор мавжуд бўлган қонуниятларга амал қилиб, атомларнинг турғунлигидан оддий водород атомининг (шунингдек, бир электронли He^+ ионларни ҳам) спектрларини ҳисоблаш мумкинлигини кўрсатди.

Бор тажриба натижаларига асосланиб, атомлар нурларни порциялар билан нурлатишини кўрсатди:

$$E = h\nu, \qquad (3)$$

бу ерда h — доимий сон бўлиб, фанга 1900 йилда немис физиги Макс Планк томонидан киритилган (3) формулага кўра, энергиянинг мумкин бўлган E_i (ёки ν_i) қийматлари узлуксиз кетма-кетликни эмас, балки дискрет қаторларни ҳосил қилади.

Бор бундан атом энергияси узлуксиз ўзгаролмайди деган хулосага келди. Атомнинг мумкин бўлган ҳолатлари дискрет кетма-кетликни ҳосил қилади ва бу ҳолатдаги атом энергиялари қуйидаги дискрет қаторларни юзага келтиради:

$$E_1,\ E_2,\ \ldots\ E_n.$$

Борнинг фикрича атом шундай стационар ҳолатлардан бирида бўлиб, нур чиқармайди ҳам, ютмайди ҳам. Бу ҳолатда унинг энергияси ҳам ўзгармайди. Атом бир стационар ҳолатдан иккинчи стационар ҳолатга сакраш йўли билан ўтади: бунда атом ҳолатлари ўзгаради.

Борнинг биринчи постулати, атомда электронлар ҳар қандай орбитада ҳаракатланмасдан, балки муайян радиусли орбита бўйлаб ҳаракатланишини кўрсатди.

Бу орбиталарда электроннинг ҳаракат миқдори моменти

$$mvr = n\frac{h}{2\pi},$$

бунда m — электрон массаси, v — унинг тезлиги, r — орбита радиуси, n — квант сони, h — Планк доимийси.

Борнинг иккинчи постулатида эса атом бир стационар ҳолатдан иккинчисига ўтишда аниқ частотали нурланишни чиқаради ёки ютади дейилади. Нурланиш частотаси эса қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$\nu_{ik} = \frac{E_k - E_i}{h}, \qquad (4)$$

бунда E_k ва E_i — атомнинг стационар ҳолатлардаги энергияси.

Ҳозирнинг ўзида Бор постулатлари классик механика ва классик электродинамика қонунларига зид эканини кўрамиз. Электрон манфий зарядланган зарра бўлгани учун унинг доиравий орбита бўйлаб ҳаракати Ньютон (классик) механикаси қонуниятларига тўғри келади.

Бироқ Ньютон механикаси Борнинг биринчи постулатидаги шартни ўз доирасида тушунтириб беролмайди. Зарядланган жисм (зарра)ларнинг доиравий орбита бўйича турғун ҳаракатини электродинамика қонунлари рад этади.

Шундай қилиб, Бор постулатлари классик физика қонунларига тўғри келмай, улар айрим масалаларнигина ҳал қилади. Шуннинг учун классик физика қонунлари қўлланиши жиҳатидан чегараланганднр. Шундай экан моддалардаги майда зарраларнинг хусусиятларини тўғри тасвирловчи табнатнинг янги қонунларини излаш талаб этилади. Бу жиҳатдан нурланишларнинг хусуснятлари нурланувчи моддалар характерининг ўзгаришига

сабаб бўлмасмикан, деган масалани аниқлаш гоят муҳим бўлиб қолади. Атомларнинг мумкин бўлган энергия қийматларининг дискретлиги ҳақидаги Борнинг асосий назариялари тўғрилигини аниқлаш зарур бўлиб қолди.

Атом энергияси қийматларининг дискретлиги 1913 йилда Ж. Франк ва Г. Герц тажрибаларида бевосита тасдиқланди. Бу тажрибанинг асосий гояси тубандагича: сийраклаштирилган газ молекулалари ва атомлари секинлаштирилган электронлар билан бомбардимон қилинганда, тўқнашиш абсолют эластик бўлганда зарранинг ички энергияси ўзгармайди. Бунда тўқнашаётган зарраларнинг кинетик энергияси тўқнашганга қадар қандай бўлса, тўқнашгандан кейин ҳам шундайлигича қолади (ҳар қандай тўқнашишда импульс сақланади).

Атомларнинг электронлар билан тўқнашиши ноэластик тўқнашиш бўлса, электроннинг атом билан тўқнашиши натижасида, тўқнашувчи зарранинг кинетик энергияси ҳисобига, атомнинг ички энергияси ортади. Зарранинг нисбий тезлиги тўқнашгандан кейин, тўқнашгунга қадар бўлган энергияга қараганда камайиб қолади. Бундай зарбалар биринчи даражали зарбалар деб аталиши қабул қилинган. Аммо бу ҳодисаларнинг тескариси бўлиши ҳам мумкин. Агар атомнинг ички энергияси зарбага қадар минимал бўлмаса, яъни атом уйғонган ҳолатда бўлса, юқоридаги ҳодиса рўй беради. Шундай атом (уйғонган атом) электрон билан тўқнашганда ўзининг ички энергиясини сақлаб ёки оширибгина қолмай (биринчи даражали зарбага тўғри келувчи, эластик зарба), ҳатто уни камайтириши ҳам мумкин. Зарралар кинетик энергиясининг йиғиндиси, яъни зарранинг нисбий тезлиги зарбадан олдингига қараганда зарбадан кейин катта бўлади, аммо атомнинг ички энергияси камаяди. Бундай зарбалар иккинчи даражали зарбалар деб аталади.

Атомлари E_1, E_2, E_3, . . , (энг паст) энергетик сатҳларда бўладиган бир атомли газлар билан танишамиз. Буларнинг иссиқлик энергияси кам бўлиб, улар атомни уйғотиш учун етарли эмас. Газга ҳар бири E энергияга эга бўлган электронлар дастасини киритамиз. Агар

$$E < E_2 - E_1 \qquad (5)$$

бўлса, бу ҳолда электрон атом билан биринчи даражали ва иккинчи даражали тўқнашишда бўлмайди ва электрон зарбаси натижасида ,атом ўзининг ҳолатини ўзгартирмайди.

Атомнинг массаси электрон массасидан бир неча минг марта катта бўлгани учун электрон билан атом эластик тўқнашганида, атомларнинг тезлиги амалда ўзгармайди ва электроннинг кинетик энергияси ҳам ўзгаришсиз қолади. Бунда фақат электрон ҳаракатининг йўналишигина ўзгаради.

Шундай қилиб, атомларнинг энергетик спектрлари дискрет бўлса, у ҳолда $E < E_2 - E_1$ энергияга эга бўлган электронлар

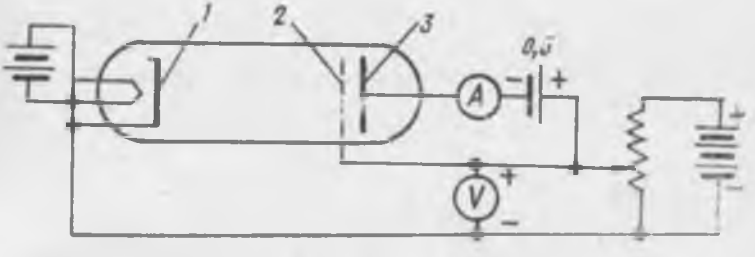
атомлар билан ўзаро тўқнашганда, уларнинг энергияси эмас, балки электронлар ҳаракатининг йўналишигина ўзгариши мумкин.

Энди электронларнинг кинетик энергияси E ни аста-секин оширa борамиз.

E катталик $E_2 - E_1$ катталикдан ортиши билан, биринчи даражали зарба юзага келади. Бунда атомнинг кинетик энергияси амалда ўзгармайди, ички энергияси эса $E_2 - E_1$ катталикка ортади. Электроннинг энергияси эса, шу катталикка камаяди ва E' га тенг бўлиб қолади:

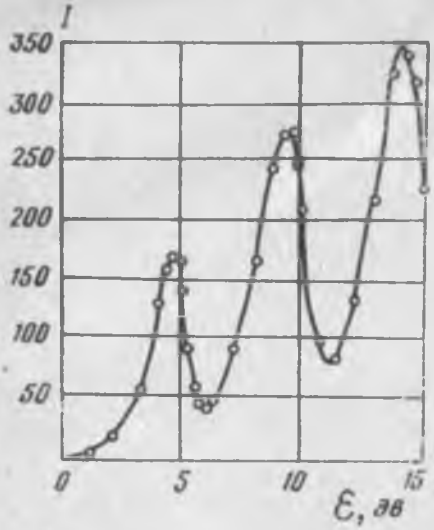
$$E' = E - (E_2 - E_1). \qquad (6)$$

Албатта, ҳамма зарбалар ҳам биринчи даражали зарбалар бўлавермайди. Баъзи электронлар атомлар билан тўқнашганда, энергияларини сақлаган ҳолда эластик сочилишга учрайди, лекин уларнинг бир қисми ноэластик тўқнашишларга дуч келади. Агар $E \ll 2(E_2 - E_1)$ бўлса, электронлар энергия йўқотмайди. Агар $E > 2(E_2 - E_1)$ бўлса, у ҳолда электрон икки марта ноэластик тўқнашишга дуч келиши мумкин ва ҳоказо. Шу нарсани таъкидлаб ўтамизки, агар атомда энергетик сатҳлар узлуксиз бўлса, у ҳолда атом ҳар қандай порциядаги энергияни, жумладан жуда кичик порциядаги энергияларни ҳам қабул қила олар эди. Электроннинг ҳар қандай энергияларида ҳам биринчи даражали тўқнашиш содир бўлар эди. 2-расмда атомларнинг дискрет энергетик сатҳларга эга эканлигини исботловчи тажрибанинг схемаси кўрсатилган.



2-расм. Резонанс потенциалини аниқлайдиган тажрибанинг схемаси:
1 — катод, 2 — анод, *3* — коллектор.

Чўғланган катоддан чиқаётган электронлар катод билан анод орасида тезлантирилади. Анод билан коллектор орасидаги фазода электр майдони йўқ ва электронлар симоб буғлари тўлдирилган (1 *мм* симоб устунига тенг босимда) ҳажмда ҳаракатланиб симоб атомлари билан тўқнашади. Вольтметр V даги кучланиш 0,5 *в* дан ортгандагина коллекторда ток пайдо бўла бошлайди. Эгри чизиқнинг кейинги ўзгаришлари резонанс потенциали билан тушунтирилади (3-расм). Токлар эгри чизигининг бирданига тушиши электронларнинг 4,9 *эв* энергиясига каррали бўлиб, бу симоб атомлари-



3-расм. Симоб учун олинган резонанс эгри чизиғи.

I — коллектордаги ток; *E* — анoддаги кучланиш.

нинг уйғотиш энергияси ($E_2 - E_1$) га мос келади. Кейинчалик тажриба методининг яхшиланиши натижасида гелий атомларининг биринчи учта энергетик сатҳлари ($E_2 - E_1 = 21{,}2$ *эв*, $E_3 - E_2 = 1{,}6$ *эв*, $E_4 - E_3 = 0{,}8$ *эв*) ни аниқлаш мумкин бўлди.

Шундай қилиб, атом энергетик сатҳларининг дискретлиги ҳақидаги Бор айтган фикрлар тасдиқланди. Бу гипотеза ёрдамида баъзи атом спектрларидаги аниқ қонуниятларни тушунтириш мумкин.

5-§. БОР НАЗАРИЯСИ

Нильс Бор замондошлари Д. Франк ва Г. Герц ҳамда Э. Резерфорд тажрибалари асосида 1913 йилда атомнинг ядро моделини ишлаб чиқди. Бунда ҳар бир атом Қуёш системасига тақлид қилиб тушунтирилган: атом марказда жойлашган ядро ва унинг атрофида ҳар хил масофада турувчи электрон қобиқларидан иборат.

Энди биз электрон қобиқлари — орбиталарининг жойлашишини кўриб чиқайлик.

Борнинг фикрича, электрон қобиқларидаги электронларнинг ҳаракат миқдори моменти $h = \frac{h}{2\pi}$ катталикка каррали (h — Планк доимийси):

$$m_e v r = n\mathrm{h}, \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \tag{7}$$

(n — бош квант сони дейилади). Атом ядроси майдонида ҳаракатланаётган заряди Ze бўлган электронни қараб чиқамиз. Агар Z-1 бўлса, бундай система водород атомидан иборат бўлади, Z нинг бошқа қийматларида эса, водородсимон атомларни, яъни тартиб номери Z бўлган ва фақат биттасидан ташқари барча электронларидан ажралган ионни ифодалайди. Электроннинг ядро билан ўзаро таъсири Кулон қонунига бўйсунади ва қуйидаги муносабат билан ифодаланади:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2} \tag{8}$$

(7) ва (8) дан фойдаланиб v ни йўқотсак, электрон қобигининг радиуси фақат бир қатор дискрет қийматлар қабул қила олиши маълум бўлади:

$$r_n = \frac{h^2}{m_e Ze^2} n^2 \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots). \tag{9}$$

Водород атомининг ($Z = 1$) биринчи қобиғи ($n = 1$) учун

$$r_1 = \frac{h^2}{m_e e^2} = 0{,}529 \cdot 10^{-8} \text{ см}. \tag{10}$$

Демак, водород атомининг электрони ядродан 0,529 $\mathring{A}$ масофада айланар экан, яъни водород атомининг диаметри тахминан 1,06 $\mathring{A}$. 1 $\mathring{A}$ (ангстрем) $= 10^{-8}$ *см*.

Атомнинг ички энергияси (ядро уйғонган деб ҳисобласак) электроннинг кинетик энергияси ва электроннинг ядро билан ўзаро таъсир энергияси (потенциал энергияси)нинг йиғиндисига тенг:

$$E_i = \frac{m_e v^2}{2} + \left(-\frac{Ze^2}{r}\right),$$

(8) га кўра

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{2r}.$$

Демак,

$$E = \frac{Ze^2}{2r} - \frac{Ze^2}{r} = -\frac{Ze^2}{2r}.$$

Ниҳоят, (9) дан Z нинг қийматини қўйиб, атомнинг ички энергиясини топамиз:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2h^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2}, \qquad (n = 1, 2, 3 \ldots) \tag{11}$$

Водород атоми ($Z = 1$) n ҳолатдан m ҳолатга ўтганда энергия чиқаради:

$h\omega = -\frac{m_e e^4}{2h^2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$, бу ерда ω нурланган ёруғликнинг частотаси бўлиб, қуйидагига тенг:

$$\omega = \frac{m_e e^4}{2h^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Шундай қилиб, биз Бальмернинг умумийлашган формуласини келтириб чиқардик. Бунда қавс олдидаги ифода Ридберг доимийсининг қийматидир:

$$R = \frac{m_e e^4}{2h^3}. \tag{12}$$

Агар бу формулага кирган доимий катталикларнинг қийматини ўз ўрнига қўйсак, у тажрибада олинган Ридберг доимийсининг қийматига мос келади.

Наганская районная
библиотека
АБОНЕМЕНТ
Инв. № 30484

Демак, Бор назариясидан келиб чиққан натижа водород атоми учун олинган тажриба натижаси билан мос келиши, бу назариядан яхшироғини излашга зарурият туғдирмайди.

6-§. ВОДОРОД АТОМИНИНГ СПЕКТРИ

Водород атомида нормал ҳолатда электрон биринчи орбитада бўлади, бу ҳолатда унинг энергияси минималдир. Барча бошқа ҳолатлар уйғонган ҳолатлар ҳисобланади, бу ҳолатларда электрон энергияси асосий ҳолатдагидан юқори бўлади. Электронни биринчи орбитадан иккинчи орбитага ўтказиш учун 10 *эв* энергия сарфлашга тўғри келади. Бу энергия электрон билан протон орасидаги электростатик тортилиш кучини бартараф қилиш учун сарфланади. Бунга эришиш учун атомни электронлар билан нишонга олиш (бомбардимон қилиш) керак. Бу электронларнинг энергияси уйғотиш энергиясидан кам бўлмаслиги керак, акс ҳолда атомга тушаётган электронлар энергиясини йўқотмасдан эластик равишда сочилиб кетади. Иккинчи қобиқдан учинчисига ўтишда кам энергияни — қарийб 2 *эв* энергияни талаб этади. Ундан кейинги қобиқларда уйғотиш энергияси борган сари янада тезроқ камайиб боради. 13,53 *эв* энергия олган электрон ядро билан боғланишини бутунлай йўқотади. Бу катталикни ионланиш энергияси деб аталади.

Электрон узоқроқ қобиқдан биринчи қобиққа ўтса, 13,53 *эв* энергия нурланади. Бошқа барча қобиқлардан биринчи қобиққа ўтишда ҳам турли энергияли квантлар нурланади. Электрон юқори қобиқлардан иккинчи қобиққа ўтганда эса 3,5 *эв* энергияли квант нурланади ва ҳоказо. Атомар водороднинг нурланиш спектрограммасида турлича энергияга эга бўлган бир қатор спектрал чизиқларни пайқаш мумкин.

Нурланадиган ҳар бир квант ўз электромагнит тебраниш частотасига ва тўлқин узунлигига эга. Ёруғлик тезлигини тебраниш частотасига бўлиб тўлқин узунлигини топиш мумкин. Ҳар бир спектрал серияларнинг чизиқлари спектрнинг қисқа тўлқинли қисмида зичлашади.

Ёруғлик спектри кўринадиган қисмининг тўлқин узунлиги 4000 Å (ультрабинафша) дан 7600 Å (инфрақизил нурланиш) гача. Тўлқин узунлиги 5500—60000 Å бўлган ёруғлик равшанроқ кўринади (кўк рангдан тўқ сариқ ранггача). Водород спектрида Бальмер сериясн деб аталувчи иккинчи сериянинг бир неча чизиғи кўринади, холос. Биринчи серия — Лайман сериясн — ультрабинафша соҳасида ётади. Барча қолган сериялар спектрнинг инфрақизил соҳасида ётади. Булардан учтаси Пашен, Брэкет ва Пфунд сериялари деб аталади.

Ҳар бир спектрал серия билан қисқароқ тўлқинлар томон ёйилган узлуксиз спектр чегарадош бўлади. Чегарада, масалан, Лайман чизиғи чегарасида узлуксиз спектр пайдо бўлишининг сабаби — маълум спектрал чизиқларни ҳосил қилувчи электрон-

ларнинг пастки орбитага фақат бошқа орбиталардангина ўтмай, балки эркин электронларнинг ҳам ўтишидандир. Эркин электронларнинг энергияси квантланмайди ва улар исталган қийматга эга бўла оладилар. Бундай электронлар пастки орбитага ўтса, унда энергияси ионланиш энергиясидан ортиқ бўлган ёруғлик квантлари нурланади. Кўпгина атомлар нур чиқарганда катта энергияли тўлқинлар (қисқа тўлқинлар)га чегарадош узлуксиз спектр пайдо бўлади. Бальмер сернясида спектрнинг узлуксиз қисмининг энергияси иккинчи орбитадаги ионизация энергиясидан ортиқ, аммо биринчи орбита электронлари энергиясидан анча кам (3,4 *эв* га яқин) бўлган электронлар ҳосил қилади. Шунинг учун Бальмер серияси билан қўшни бўлган узлуксиз спектрнинг чегараси Лайман сернясига кўра узунроқ тўлқинлар томонида ётади. Пашен серияси учун бу чегара янада узунроқ тўлқинлар томон сурилади ва ҳоказо.

Юқорида айтилганларнинг ҳаммаси нурланиш спектрига тааллуқлидир. Ютилиш спектрлари ҳам шундай тузилишга эга. Бу спектрлар атомар водороднн узлукқиз спектр ёрдамида нурлантириш натижасида ҳосил бўлади. Электронлар биринчи орбитадан юқорироқ орбиталарга ўтишида мос маълум энергияли нурларни ютиб, водород ютилиш спектрининг биринчи серияснни беради. Иккинчи орбитадан юқорироқ орбитага ўтиш ютилиш спектрининг иккинчи чизиқлар сериясини беради ва ҳоказо. Юқорида айтилганидек, ютилиш ва нурланиш спектрограммаларида фақат Бальмер сериясининг баъзи чизиқларигина яхши кўринади.

Шуниси қизиққи, атомар водороднинг спектрлари ердаги манбалардан кўра қуёшдаги манбаларда яхшироқ ҳосил бўлади. Қуёшда, масалан, протуберанцларда, водород жуда юқори температураларгача қизиган бўлади, ер шароитида бундай температурага эришиб бўлмайди. Кейинги йиллардагина термоядро реакцияларини текширнш учун мўлжалланган қурилмаларда водород учун юқори температураларга эришиш имкониятн туғилди.

Шуни эслатиб ўтамизки, бу параграфда бир неча марта ишлатилган электронвольт ибораси энергия бирлиги бўлиб, у $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *эрг* га тенг.

Эв бирлигининг номи электроннинг 1 *в* потенциаллар айирмасини ўтишда 1 *эв* энергияни олиши ёки йўқотишидан келиб чиққан.

Водороднинг ҳар бир атомига 1 *эв* энергия берилганда, унинг температураси қанчага ортишини ҳисоблаймиз. 1 *эв* энергияни $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град* га тенг бўлган Больцман доимийсига бўлсак, 11 600°С температура келиб чиқади. Электронвольт ва Цельсий градуси ҳисобида ифодаланган температура орасидаги муносабат ана шундайдир. Реакцияни сезиларли даражада ўтказиш учун бир неча ўн минг электронвольт (бир неча ўн килоэлектронвольт) энергия талаб этилади. Агар градус ҳисобида ўлчанган температура тушунчасига риоя қилсак, у ҳолда газ бир неча юз миллион

градусгача исийди. Дарвоқе, физиклар бу тушунчадан фойдаланишни ёқтирмайдилар ва зарралар энергиясини ёки температурасини электронвольт, килоэлектронвольт ҳисобида ўлчашни афзал кўрадилар. Кишини ҳайратда қолдирмоқчи бўлганларида одатда градус ҳақида гапирадилар. Градус ҳисобида ифодаланган рақамлар ўз катталиги билан ҳайратда қолдирарлидир. Юз миллион градус! Бу жуда катта сон. Ана шундай юқори температураларда ҳам ядроларнинг бир қисмигина бирикади, холос.

Ядро физикасида энергия бирлиги сифатида электронвольтдан 10^6 марта (миллион марта) катта бўлган мегаэлектронвольтдан фойдаланилади. $1\ Мэв = 1{,}6 \cdot 10^{-6}\ эрг$.

Шундай қилиб, Бор пастулотлари оддий водород атоми спектридаги муҳим қонуниятларни изоҳлашга имконият яратади. Бироқ, Бор постулатлари спектрларни ва умуман мураккаб, кўп электронли атомларнинг хусусиятларини баён этиш учун қулай эмас.

Қандай сабабларга кўра электронлар узоқ орбиталардан ядрога яқин орбиталарга ўтади ва у қандай тартибда содир бўлади (масалан, водород атомида 4-орбитадан 1-орбитага тўғридан-тўғри ўтиш, шу билан бирга «поғонали» ўтишлар $4 \to 2$ кейин $2 \to 1$; $4 \to 3$; $3 \to 1$ ва ниҳоят, $4 \to 3$; $3 \to 2$; $2 \to 1$ каби бўлади) деган масала очиқ қолди. Ҳар хил вариантдаги ўтишлар учун маълум фотонлар тўғри келади ва спектрларда кузатилади. Бироқ уларнинг интенсивлиги ҳар хил бўлади ва шунга биноан баъзилари кўпроқ фотон чиқаради, унга тўғри келадиган ўтишлар кўпроқ бўлади. Нима учун? Бу савол жавобсиз қолди.

Ҳар ҳолда Бор пастулотлари атом ҳақидаги фаннинг ривожланиши тарихида катта роль ўйнади. Улар катта жисмлар учун топилган ва тажрибаларда тасдиқланган табиат қонунларини, кичик жисмларга — атом системаларига эски тушунчалар ва қонунларни қўлланиш чегарали эканлигини кўрсатади. Атомлар ҳақидаги илмий тушунчаларнинг бу табиий ривожланиш процесси, айрим метафизикларча фикрловчи олимлар томонидан фаннинг инқирози деб баҳоланди. Электрон назариясини кашф этган буюк олим Лоренц ҳам шундай хулосага келди, чунки у «электрон-ҳаракатдаги нуқтали зарядланган зарра» деган тушунчани илгари суриб электродинамика қонунларини абсолютлаштирди.

Билиш бу чексиз процесссдир, бу соҳада ташланган ҳар бир қадам объектив борлиқнинг янада аниқроқ аксини беради, лекин қўлга киритилган ҳеч қандай босқич унинг тўла аксини беролмайди.

7-§. КВАНТ СОНЛАР

Электрон ядродан турли масофада жойлашган маълум орбитада (қобиқда) атом ядроси атрофида ҳаракатланади. Қобиқлар атом ядросидан бошлаб K, L, M, N, Q, P ҳарфлари билан белгиланади. Ядрога яқин орбитада ҳаракатланувчи электрон K-элек-

трон деб аталади. Орбиталарни ядрога яқин орбитадан бошлаб 1, 2, 3, 4... рақамлар билан номерлаш мумкин. Бу сонлар атомнинг бош квант сони деб аталади ва n ҳарфи билан белгиланади. Масалан, $n=1, 2, 3...$

Нормал ҳолатда водород атомида электрон биринчи қобиқда бўлади. Электронни бирор пастки қобиқдан узоқроқ қобиққа ўтказиш учун унга маълум миқдорда энергия ёки квант энергияси бериш керак. Электрон ядрога яқин орбитага қайтганда атом ўша миқдордаги энергияни ёруғлик кванти тариқасида чиқаради. Водород атомининг бош квант сони бирдан ортиқ бўлган барча ҳолатлари уйғонган ҳолат деб аталади. Уйғонган ҳолатда атом радиуси бош квант сонининг квадратига пропорционал бўлади. Бош квант сони иккига тенг бўлган атомнинг диаметри уйғонмаган атомнинг диаметридан тўрт марта ортиқ. Масалан, $n=3$ бўлганда диаметр 9 марта, $n=10$ бўлганда диаметр 100 марта ортиқ бўлади ва ҳоказо.

Электронларнинг фақат махсус орбиталар бўйлаб ҳаракати, маълум миқдордаги энергияга эга бўлган квантларнинг ютилиши ва чиқарилиши фақат кичик жисмлар дунёси — микродунё учунгина хосдир. Катта жисмлар дунёсида, яъни макродунёда бундай ҳоллар учрамайди.

Электронларнинг бир орбитадан бошқа орбитага ўтиш вақтида атом ютадиган (чиқарадиган) квантлари ажойиб хоссага эга; уларнинг миқдори чиқариладиган ёки ютиладиган ёруғликнинг тебраниш частотаси ν га пропорционалдир. Бунда тебраниш частотаси фақат бутун сон бўлади. Квант энергияси $E=h\nu$, бу ерда h — Планк доимийси. Баъзи ҳолларда бу доимийликни таъсир кванти деб ҳам атайдилар ва у $6{,}625\cdot10^{-27}$ *эрг.сек* га тенг. Унинг ўлчами энергиянинг вақтга кўпайтмаси ёки ҳаракат миқдори моменти ўлчами кабидир. Энергия бирлиги *эрг*—бир дина кучнинг бир сантиметр йўлда бажарган иши эканлигини эслатиб ўтамиз. *Дина* — массаси бир грамм бўлган жисмнинг тезланишини бир секундда бир сантиметр /секундга квадратга ўзгартирувчи кучдир.

Механикада ҳаракат миқдори моменти ҳаракатланувчи масса билан, унинг тезлиги ва ҳаракатланувчи массадан айланиш марказигача бўлган масофанинг кўпайтмасига тенг. Ўнг резьбали винт жисм айланиши йўналиши бўйича айланганда, қайси томонга йўналса, ҳаракат миқдори моменти ҳам айланиш ўқи бўйича ўша томонга йўналган бўлиб, уни аксиал вектор деб аталади.

Электроннинг ҳаракат миқдори моменти тажриба ва квант механикаси кўрсатишича квантланади, яъни исталган қийматларга эга бўлмасдан, фақат маълум қийматларга эга бўлади.

Ҳаракат миқдор моменти $\hbar=\frac{h}{2\pi}$ га тенг бўлган миқдоргагина ўзгара олади. Ядро атрофида бир орбита бўйича ҳаракатланадиган электрон учун у бир неча қийматга эга бўлиши мумкин. Уларнинг ҳар бири бир-биридан $\hbar$ га фарқ қилади. Бу момент орбитал квант

сони (l) билан $\hbar$ нинг кўпайтмасига тенг. Берилган қобиқ учун (K, L, M, N ва ҳоказо) орбитал квант сонининг максимал қиймати бош квант сонидан бирга кам бўлиб. минимал қиймати эса, нолга тенг. Чунончи, K-қобиқ учун бош квант сони $n=1$, орбитал квант сони эса фақат бир қийматга эга бўла олади ($l = 0$). L-қобиқ учун бош квант сони $n = 2$, орбитал квант сони $l = 1$. Бу қобиқ учун максимал орбитал сондан ташқари бирга кам бўлган сон ҳам бўлиши мумкин, яъни у нолга тенг бўлиши мумкин. M-қобиқ учун $n = 3$ ва орбитал квант сонлари $l = 2$, $l = 1$, $l = 0$ бўлиши мумкин. Бош квант сонлар бутун сон қийматларини, яъни 1 дан n гача, орбитал квант сони эса 0 дан $(n - 1)$ гача бўлган бутун сон қийматларини қабул қилади.

$l = 0$, 1, 2, 3 ва ҳоказоларга мос келувчи ҳолатлар мос равишда s, p, d, f ва ҳоказо ҳарфлар билан белгиланади. Бош квант сонлар электроннинг орбита радиусидан ядрогача бўлган масофага боғлиқ энергия миқдорини характерлайди, орбитал квант сонлар эса, электроннинг орбитадаги ҳаракат миқдори моменти қийматини ифодалайди.

Ядродан бошлаб биринчи қобиқда (K-қобиқда) орбитал квант сони нолга тенг, демак, электроннинг ҳаракат миқдори моменти ҳам нолга тенг бўлади. Бу ҳолда фақат s ҳолат бўлиши мумкин. Аммо, агар электрон орбита бўйлаб ҳаракатланса, албатта у ҳаракат миқдори моментига эга бўлиши керак-ку! Бир-бирига зид фикрга дуч келдик. Демак, биз юритган мулоҳазалар етарли даражада чуқур эмас экан. Ҳақиқатда эса, электрон s ҳолатда бўлса, унинг ядро атрофида айланиши ҳақида гап юритиш мумкин эмас. Электрон радиуси бош квант сонига мос бўлган ядрони ўраб олган сфера сиртининг исталган нуқтасида бўлиши мумкин дейиш мақсадга мувофиқдир. Квант сони каттароқ бўлганда сферанинг радиуси ҳам катта бўлади, аммо s ҳолат учун ($l = 0$) ҳам электронни сиртнинг исталган нуқтасида пайқаш ўхтимоллиги юқоридагидек бўлади. Иккала ҳолда ҳам маълум орбита, шунингдек, электроннинг сфера бўйлаб ҳаракат йўналишн мавжуд эмас.

Электроннинг ҳаракат миқдори моменти нолга тенг бўлмаса, электрон қандайдир маълум орбита бўйлаб ҳаракатланиш тезлигига эга бўлади. Демак, унинг хоссалари шу қобиқда бўлган, аммо ҳаракат миқдори орбитал моментга эга бўлмаган электрон хоссаларидан бир оз ўзгача бўлади. Шунинг учун бош квант сони бирдан ортиқ бўлган қобиқда бир-биридан орбитал квант сонлари бўйича фарқ қилувчи бир неча қобиқчалар бор. Биринчи қобиқда орбитал момент нолга тенг, шунинг учун у қобиқчаларга бўлинмайди. Иккинчи қобиқда икки қобиқча s ва p ($l = 0$ ва $l = 1$), учинчи қобиқда уч қобиқча s, p ва d ($l = 0$, $l = 1$ ва $l = 2$) мавжуд.

Бош ва орбитал квант сонларидан ташқари электронни водород атомида бўлиши мумкин бўлган ҳолатларининг умумий сонини орттирувчи яна икки квант сон мавжуддир. Электрон

орбита бўйлаб ҳаракат қилиб электр токи (орбитал ток) пайдо қилади. Шунинг учун электрон худди ҳалқасимон ўтказгичдан ўтаётган ток каби магнит майдони ҳосил қилади ва бу магнит майдоннинг йўналиши парма қоидаси бўйича аниқланади. Ҳалқасимон электр токи ҳосил қилган магнит майдонининг миқдори магнит моменти билан характерланади. Агар орбитал ток ҳосил қилган магнитни ташқи магнит майдонига жойлаштирсак, у ташқи магнит майдонига нисбатан қандайдир бурчак остида оғади. Оғиш бурчаги қанча кичик бўлса, орбитал ток магнит моментининг ташқи майдон йўналишига бўлган проекциясининг миқдори шунча катта бўлади.

Орбитал моментнинг ташқи магнит майдони йўналишига проекцияси ҳам квантланади, яъни у ҳар қандай қийматга эга бўлавермасдан бир-биридан фақат h га фарқ қилувчи қийматларгагина эга бўлади. Демак, агар орбитал квант сони иккига тенг бўлса, у ҳолда магнит квант сони (m) 2, 1, 0,—1,—2 га тенг бўла олади. Орбитал моментнинг берилган йўналишга проекцияси миқдорини ифодаловчи сон магнит квант сони деб аталади. l га тенг бўлган орбитал квант сони учун магнит квант сони m бир-биридан фақат бирга фарқ қилувчи $+l$ дан $-l$ гача бўлган барча қийматларни олиши мумкин. Магнит майдонида l орбитал сонга мос ҳолат магнит квант сонлари билан фарқ қилувчи $(2l+1)$ ҳолатга ажралади. Атом магнит майдонида бўлганда турли магнит квант сонларига эга бўлган ҳолатдаги электронлар ўз энергиялари билан фарқ қилади. Чунки, орбитал магнит моменти билан ташқи магнит майдоннинг ўзаро таъсир энергияси ҳаракат миқдори моментининг магнит майдони йўналишида олинган проекциясига, яъни магнит квант сонига боғлиқдир. Ташқи магнит майдони бўлмаса турли магнит сонларига эга бўлган барча ҳолатларнинг энергияси бир хил бўлади, улар физикларнинг айтишича бир хил наслли бўлади.

Электрон ўз ўқи атрофида айланаётган пилдироққа ўхшайди. Унинг ҳам ўз ҳаракат миқдори моменти бўлиб, уни спин деб аталади (спин инглизча сўз бўлиб, айлантирмоқ деган маънони билдиради). Бу ҳаракат миқдори моменти 1/2 h га тенг. Ҳаракат миқдори моменти h бирликларида ўлчаниши маълум бўлгани учун, одатда, электрон спини 1/2 га тенг деб ифодалаш қабул қилинган (h туширib қолдирилади). Орбита бўйлаб айланаётган электронни кўз олдимизга келтирайлик. Спин йўналиши орбитал моменти йўналган томонга ёки унга қарама-қарши йўналган бўлиши мумкин. Бу икки йўналишда ҳам спиннинг қиймати бир-биридан фақат бирга, яъни h га фарқ қилади. Демак, спин ҳам квантланади. Спин квант сони m_z иккита қийматга эга бўлиши мумкин: спин орбитал моментга параллел йўналганда $m_z=\frac{1}{2}$, унга антипараллел йўналганда эса, $m_z=-\frac{1}{2}$ бўлади. Ҳаракат миқдори моменти нолга тенг бўлган s-ҳолатда ҳам спин бир-бирига қарама-

қарши икки йўналишга эга бўлиши мумкин. s-ҳолатда ядро—протоннинг ҳаракат миқдори моменти электрон спини учун ориентир сифатида хизмат қилади.

Биз ўқувчига квант сонлари ва уларга мос келувчи ҳолатларни айтиб ўтдик. Аммо бу унчалик эсда қолмаса керак. Бу жуда ҳам аҳамиятга эга эмас,чунки биз квант сонларини чуқур баён этаётганимиз йўқ. Шуни айтиб ўтиш керакки, бу квант сонлари 1926 йилда Австрия физиги Э. Шредингер топган тенгламани ечишдан келиб чиқади. Оламшумул илмий кашфиётлари учун Шредингер 1934 йилда СССР Фанлар академиясининг чет элдаги аъзоси қилиб сайланди. Шредингер тенгламаси микродунё физикасида муҳим ва фундаментал аҳамиятга эгадир.

Шуни айтиб ўтиш ҳам ўринлики, протоннинг спини ҳам электроникн каби $^1/_2$ га тенг. Спин $^1/_2$ бўлган элементар зарралар фермионлар деб аталади. Фермионлар жуда зўр индивидуалистдирлар: ҳар қандай квант ҳолатда фақат бир фермион бўлиши мумкин.

Атомдаги электрон учун бу принципни 1925 йилда Швейцария физиги Вольфганг Паули тавсифлади. Кейинчалик машҳур физик Ферми $^1/_2$ спинли барча зарралар (фермионлар)га мос келувчи статистикани ишлаб чиқди. У исталган системадаги фермионлар учун, масалан, атом ядросидаги заррачалар учун, Паули принципи ўз кучини сақлашини исбот қилди.

8-§. ЭЛЕКТРОН КОНФИГУРАЦИЯЛАР

Ҳозирги замон квант механикасида электронларнинг атомда ҳаракатланиш ҳолати тўртта квант сони билан характерланади:

1) n бош квант сони 1 дан ∞ гача бутун сон қийматларин олади.

2) орбитал квант сони l эса 0 дан $n-1$ гача (ҳаммаси бўлиб n қийматларни) бутун сонларни олади.

3) магнит квант сони (m_l) эса $-l$ дан $+l$ гача бутун сон қийматларни (ҳаммаси бўлиб $(2l+1)$ та қийматни) олади.

4) спин квант сони m_s эса $+1/2$ ва $-1/2$ қийматларнигина олади. Биринчи тақрибий ҳисобда биз электроннинг атомдаги ҳолатини электронлар ўртасида ўзаро таъсир бўлганда ҳам шу квант сонлари билан характерлай оламиз. Бир хил бош квант сонига эга бўлган электронлар тўплами атом қобиғини ташкил қилади. Атомнинг ҳар хил қобиқлари қуйидаги схема бўйича белгиланади:

Бош квант сони	1	2	3	4	5
Қобиқнинг номи	K	L	M	N	O

Электронлар орбитал ҳаракатининг ҳолатлари юқоридаги бизга маълум бўлган схема бўйича s, p, d, f ва ҳоказо ҳарфлар билан белгиланади:

Орбитал квант сони	0	1	2	3	4
Орбитал ҳолатнинг номи	s	p	d	f	g

Бир хил l қийматга эга бўлган электронлар йиғиндиси группача дейилади.

Элементлар даврий системасининг назарияси асосида икки принцип ётади.

1) Паули принципи: атомда ҳамма электронларнинг ҳолати ҳар хил;

2) энергия минимуми принципи: атомдаги электронлар учун минимал энергияли ҳолат мавжуд бўлади.

Энергия минимуми принципи атомнинг барқарорлиги нуқтаи назаридан қараганда табиий заруратдир: агар берилган ҳолат минимал энергетик ҳолат бўлмаса, атом ички сабабларга кўра пастроқ энергетик ҳолатга ўтиши мумкин ва пировардида минимал энергетик ҳолат вужудга келиши керак. Паули принципи атомнинг мумкин бўлган ҳолатларининг квант хусусиятларини ҳисобга олади.

Элементлар даврий системасини тузаётганда биринчи тақрибий ҳисобда электронларнинг ўзаро таъсирлашув энергияси ҳисобга олинмаслиги ва атомнинг энергияси ядронинг кулон майдонидаги электронлар энергияларининг йиғиндисидан иборат деб ҳисоблаш табиийдир. Ядронинг кулон майдонидаги электронларнинг энергияси маълум, шунинг учун электронларнинг Паули принципини эътиборга олган ҳолда ҳар хил ҳолатлар бўйича минимал энергияга эга бўлган тақсимотини топиш қийин эмас. Натижада, муҳокама қилиниши фойдали бўлган, қобиқларнинг реал тўлдирилишидан анча фарқ киладиган идеал тўлдириш келиб чиқади.

Аввало, Паули принципини ҳисобга олиб, у ёки бу қобиқда қанча электрон бўлиши мумкинлигини кўриб чиқайлик. Магнит квант сони ва спин квант сонидан кўринадики, берилган n ва l қийматли электронлар сони $2(2l+1)$ та, чунки l нинг берилган қийматида m_l — магнит квант сони $(2l+1)$ та қийматга эга ва ҳар бир m_l да m_s икки қиймат қабул қилади. n нинг берилган қийматида l катталик 0 дан $(n-1)$ гача бўлган n та қиймат қабул қилади. Шунинг учун берилган бош квант сони n га тўғри келадиган электронларнинг максимал сони

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2, \qquad (13)$$

яъни берилган қобиқда $2n^2$ дан кўп бўлмаган электрон жойлаша олади (1- жадвалга қаранг).

1- жадвал

n ва l қийматларга эга бўлган қобиқлардаги электронларнинг умумий сони

n \ l	0	1	2	3	4	Ҳамма электронлар сони ($2n^2$ та)
	s	p	d	f	g	
K 1	2					2
L 2	2	6				8
M 3	2	6	10			18
N 4	2	6	10	14		32
O 5	2	6	10	14	18	50

Маълумки, Бор назариясига асосан электронлар энергияси n га кўра ортиб боради. K-қобиқдаги ($n=1$) электронлар, ундан кейин L-қобиқдаги ($n=2$) электронлар минимал энергияга эга ва ҳ.к. Бу K, L, M, ... қобиқлар K дан бошлаб кетма-кет тўлдирилишини билдиради. Аммо, s, p, d, f ҳолатлар қандай тартибда тўлдирилишини осонгина аниқлаб бўлмайди, чунки бу ҳолда электроннинг энергияси l га боғлиқ эмас. Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, электронлар ўртасидаги қўшимча ўзаро таъсир ҳисобга олинса, уларнинг энергияси (берилган n да) l ортиши билан ортиб боради. Шунинг учун идеал схемани тузишда қобиқларнинг тўлдирилиши $l_{min}=0$ дан бошланиб, $l_{max}=n-1$ да тугалланади, деб қабул қилинади. Хулоса қилиб шуни айтиш мумкин. Орбиталарни тўлдиришнинг идеал схемаси қуйидаги принципда тузилган: янгидан қўшилаётган ҳар бир электрон атомга Паули принципи бўйича мумкин бўлган энг кичик l ва n квант сонлари билан характерланадиган ҳолатда боғланади.

Қобиқ тўлдирилганда Менделеевнинг элементлар даврий системасидаги инерт газларнинг электрон конфигурациясига тўғри келадиган барқарор электрон конфигурация вужудга келади. Ундан сўнг кейинги қобиқ тўлдирила бошлайди, бундаги биринчи элемент ишқорий металл бўлади.

Элементларнинг химиявий хусусиятлари ташқи электронларга боғлиқ. Навбатдаги қобиқ тўлдирилишида ундан олдинги қобиқ тўлдирилишидаги тартиб такрорлангани сабабли элементларнинг химиявий хусусиятлари қобиқдан қобиққа ўтган сари даврий равишда ўзгариб туради: ҳар бир қобиқнинг тўлдирилиши ишқорий металлдан бошланиб инерт газ билан тугалланади. Шунинг учун, қобиқ тўлдирилаётганда ҳосил бўлган элементлар Менделеев даврий системасини ташкил қилади. 1- жадвалдан кўриниб турибдики, қобиқлар тўлдирилиши идеал схемасининг кетма-кет даврларидаги электронлар сони 2, 8, 18, 32, 50 та бў-

лиши керак. Менделеев даврий системасининг кетма-кет даврларида эса, электронлар сони 2, 8, 8, 18, 18, 32 га тенг. Шундай қилиб, элементлар даврий системасининг тузилиши қобиқлар тўлдирилишининг идеал схемасидан катта фарқ қилар экан.

Қобиқларни тўлдирилишининг реал ва идеал схемалари орасидаги фарқнинг сабаби шуки, идеал схема тузилишдаги дастлабки шартлар кўпгина элементлар учун риоя қилинмайди. Электронларнинг ўзаро таъсирини ва майдоннинг аслида Кулон майдонидан фарқли эканлигини ҳисобга олиш лозим.

9-§. ЭЛЕКТРОН ҚОБИҚЛАРНИНГ ТУЗИЛИШИ

Мураккаб атомларнинг электрон қобиқларининг тузилиш принципига яхши тушуниш учун электронлари кам бўлган атомлар учун қўлланадиган водород атомининг квант сонлари системасини эслатиб ўтамиз. Бош квант сони n — қобиқ номерини кўрсатади. Биринчи қобиқ учун у 1 га, иккинчи қобиқ учун 2 га тенг ва ҳоказо. Орбитал квант сони l электрон орбитал моментн миқдорини h бирлигида кўрсатади. Бу квант сонининг максимал қиймати бош квант сонидан бирга кам бўлади. Орбитал момент максимал миқдордан ташқари нолгача бўлган бир-биридан бирга фарқ қилувчи барча қийматларга эга бўла олади .

Магнит квант сони орбитал моментнинг бирор исталган йўналишдаги проекциясини кўрсатади. Проекция $+l$ дан $-l$ гача бўлган бир-биридан 1 га фарқ қилувчи қийматларга эга бўлиши мумкин. Спин квант сони m спинининг орбитал моментга нисбатан, агар орбитал момент нолга тенг бўлса (s- ҳолат), ядро спинига нисбатан икки ориентациясига кўра икки хил қийматга эга бўлиши мумкин. Спин сонининг бир қиймати иккинчисидан албатта бирга фарқ қилади. Атомда электронлар сони кам бўлганда, орбитал момент ташқи магнит майдони бўйича ориентирланади. Ташқи майдон билан орбитал момент орасидаги богланиш орбитал момент билан спин боғланишдан кучлироқ бўлади.

Электронлари кўп бўлган атомларда квант сонлари системаси водород атомининг квант сонлари системасидан бир оз фарқ қилади. Бундай атомларда орбитал момент спин моменти билан умумий моментга қўшилади. Бу тўла момент электроннинг ҳаракат миқдори моменти бўлиб, ташқи майдонга нисбатан турли йўналишларда бўла олади. Бу ҳолда орбитал ва спин моментлари орасидаги боғланиш жуда кучли бўлар экан. Юқорида баён этилганларга кўра атомда электрон ҳолати қуйидаги квант сонлари билан характерланади: бош квант сони n_1, орбитал квант сони l_1, ҳаракат миқдорининг тўла моменти j, тўла моментнинг бирор йўналишга проекцияси m (бу ерда «бирор» йўналиш дейилаяпти, чунки ташқи магнит майдони ихтиёрий йўналишда бўлиши мумкин). Шунинг учун тўла моментнинг қайси йўналишга проекцияси олинмасин, унинг проекцияси бир-биридан фақат бирга фарқ қилувчи қийматларга тенг бўла олади.

Унинг максимал қиймати $+j$, минимал қиймати $-j$ бўлиши мумкин. Ташқи магнит майдони бўлмаганда турли магнит квант сонларига эга бўлган қобиқлар бир-бирларига мос келиб қўшилади, аммо атомда электронларнинг бўлиши мумкин бўлган ҳолатлар сони камаймайди.

Фараз қилайлик, қандайдир бир қобиқда фақат бир электрон бўлсин, s-ҳолатда орбитал момент нолга тенг. Шунинг учун s-ҳолатда тўла момент ўз (спин) моментига, яъни $^1/_2$ га тенг. Орбитал момент бўлмаганда тўла моментнинг ташқи магнит майдонига проекцияси фақат икки қийматга $+^1/_2$ ва $-^1/_2$ га эга бўлиши мумкин. Электрон ҳолатларнинг бўлиши мумкин бўлган тўла сони бу ҳолда 2 га тенг. Орбитал моменти бирга тенг бўлган p-ҳолатда тўла момент икки қийматга эга бўлиши мумкин: спин орбитал моментга антипараллел бўлганда $^1/_2$ га, параллел бўлганда $^3/_2$ га тенг. Шунингдек, ҳаракат миқдори тўлиқ моментининг ташқи майдон йўналишига проекцияси тўла момент $^1/_2$ га тенг бўлганда $^1/_2$ ва $-^1/_2$ га; тўла момент $^3/_2$ га тенг бўлганда $^3/_2$; $^1/_2$; $-^1/_2$ ва $-^3/_2$ га тенг бўлади. Демак, s-ҳолатда умумий қобиқлар сони 2 бўлса, p-ҳолатда у 6 га етади. Бошқа ҳолатлар учун ҳам бўлиши мумкин бўлган комбинациялар сонини ҳисоблаш қийин эмас, масалан, d ҳолат учун у 10 га тенг (1-жадвалга қаранг).

Бир неча электронли атомлар учун сатҳлар, аниқроғи ҳолатлар ёки термлар системаси бир электрондаги сатҳлар системаси каби бўлади. Унинг фарқи фақат шундаки, биринчи ҳолда спин барча электронлар спинларининг вектор йиғиндиси S га тенг. Тўла орбитал момент эса, барча электронлар орбитал моментларининг вектор йиғиндисига тенг бўлиб, уни L ҳарфи билан белгиланади. Тўла спин ва тўла орбитал моментлар қўшилиб барча электронлар учун ҳаракат миқдорининг тўла моменти J ни ҳосил қилади. Тўла момент $L+S$ дан $L-S$ гача бўлган исталган қийматга эга бўла олади. Ҳаракат миқдори тўла моментининг ҳар бир қийматининг проекцияси бир-биридан бирга фарқ қилувчи J дан $-J$ гача бўлган барча қийматларга эга бўла олади.

Атомда электронлар кўп бўлганда ва уларнинг бир қисми уйғотилганда сатҳлар ёки терминларнинг мураккаб манзараси вужудга келади. Элементларнинг мураккаб қобиги спектри оддий структурага эга эмас. Бунга ўхшаш нозик томонларига батафсил тўхталиб ўтирмаймиз, фақат нормал уйғонмаган ҳолатдаги элементларнинг жадвалини тузиш тартибини кўриб чиқамиз. Бунинг учун битта электроннинг бўлиши мумкин бўлган ҳолларини асос қилиб олиш мумкин.

Д. И. Менделеевнинг элементлар даврий системасидаги даврлар қандайдир бош квант сонига эга бўлган янги қобиқни тўлдиришдан бошланади.

Менделеев жадвалининг биринчи даврида иккита элемент бор; водород — биринчи даврнинг биринчи элементи. Биринчи

қобиқдан яна бир электрон ўрин олиши мумкин. 1 *s* ҳолатда икки электронга эга бўлган элемент гелийдир. Атоми икки электронга эга бўлган биринчи давр гелий билан тугайди. Қобиғи тўлган атом инерт газлардир. 1-жадвалдан кўринишича иккинчи қобиқда (бош квант сони 2) саккизта электрон жойлаша олади, у саккизта бўлиши мумкин бўлган ҳолатларга эга. Учинчи электрон 2 *s* ҳолатга тушиб водородга ўхшаш элемент — литийни ҳосил қилади. Кейинги қобиқларнинг тўлдирилиши Д. И. Менделеев системасидаги инерт газ — неон билан туговчи иккинчи давр элементларини беради. Неонда ҳаммаси бўлиб 10 та электрон бор. Улардан иккитаси биринчи қобиқда, саккизтаси эса иккинчи қобиқда ҳаракатланади. Электронларидан бири *s* ҳолатда учинчи қобиқда бўлган элемент ҳам водородга ўхшаш элементлар қаторига киради — бу ишқорий металл — натрийдир.

Учинчи қобиқдан бошлаб оддий қоидадан чекинишлар бошланади. Энди 2-жадвални кўриб чиқиш мақсадга мувофиқдир, чунки унда турли бош квант сонларига эга бўлган қобиқлар бўйича электронларнинг тақсимланиши кўриниб турибди.

s ва *p* ҳолатларда учинчи қобиқда ўрин бўлишига қарамай, электронлар тўртинчи қобиқдан ўрин ола бошлайди. Бу ҳолни орбитал момент катта бўлган 3*d* ҳолатда кўриш мумкин. Бу ҳолда учинчи қобиқда 18 та ҳолат бўлади: иккита *s*-ҳолат, олтита *p*-ҳолат ва ўнта *d*-ҳолат. Аммо электронлар *d*-ҳолатни «ёқтирмайдилар», улар ўзларига қулай бўлган *s*-ҳолатга, жуда бўлмаганда *p*-ҳолатга кўтарилади. Учинчи давр аргон билан тугайди. Тўртинчи давр ҳам ишқорий металл — калийдан бошланади. Сўнгра бутун бу даврда тўртинчи қобиқ *s* ва *p* ҳолатлари бирин-кетин тўлдирилади. Электронлар тўртинчи қобиқдаги *s* ва *p* ҳолатларни тўлдирганларидан сўнг, бешинчи қобиқдаги *s* ва *p* ҳолатлардан ўрин олишни афзал кўрадилар. Бу ҳол учинчи қобиқда барча *d*-ҳолатлар тўлдирилгандан сўнг рўй беради. Аммо тўртинчи қобиқда ҳам *d* ва *p* ҳолатлар бор. Тўртинчи қобиқдаги 32 ўриндан фақат 8 таси тўлган холос, бўш ўринлар жуда кўп, аммо электронлар «ўзбошимчалик» қилиб юқори қобиқларга кўтариладилар, чунки улар *d* ва *p* ҳолатларни ёқтирмайдилар.

Элементларнинг **химиявий хоссалари ташқи электронлар**га боғлиқ. Олтинчи даврда (2-жадвалга қаранг) ажойиб ҳодисани кузатиш мумкин. Лантандан бошлаб лютецийгача бўлган элементлар бир хил икки ташқи қобиққа эга (бош квант сонлари 5 ва 6). Бу группадаги ҳар бир сўнгги элемент тўртинчи қобиқдаги қолдирилиб кетган *d* ва *p* ҳолатларни тўлдириш натижасида пайдо бўлади. Аммо бешинчи ва олтинчи қобиқларда электронлар бўлганда, айниқса, олтинчи қобиқда *s* ҳолат тамомила тўлганда, тўртинчи қобиқ ташқи қатламлардан анча йироқда бўлади. Унинг тўлдирилиши элементларнинг химиявий хоссаларига деярли таъсир қилмайди. Шунинг учун группанинг

Атом қобиқларида электронларнинг тақсимланиши

№	Элемент	K	L	M			N				O				P				Q
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s
1	2	3	4		5			6				7				8			9
1	H	1																	
2	He	2																	
3	Li	2	1																
4	Be	2	2																
5	B	2	2	1															
6	C	2	2	2															
7	N	2	2	3															
8	O	2	2	4															
9	F	2	2	5															
10	Ne	2	2	6															
11	Na	2	2	6	1														
12	Mg	2	2	6	2														
13	Al	2	2	6	2	1													
14	Si	2	2	6	2	2													
15	P	2	2	6	2	3													
16	S	2	2	6	2	4													
17	Cl	2	2	6	2	5													
18	Ar	2	2	6	2	6													
19	K	2	2	6	2	6		1											
20	Ca	2	2	6	2	6		2											
21	Sc	2	2	6	2	6	1	2											
22	Ti	2	2	6	2	6	2	2											
23	V	2	2	6	2	6	3	2											
24	Cr	2	2	6	2	6	4	1											
25	Mn	2	2	6	2	6	5	2											
26	Fe	2	2	6	2	6	6	2											
27	Co	2	2	6	2	6	7	2											
28	Ni	2	2	6	2	6	8	2											
29	Cu	2	2	6	2	6	10	1											
30	Zn	2	2	6	2	6	10	2											
31	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1										
32	Ge	2	2	6	2	6	10	2	1										
33	As	2	2	6	2	6	10	2	3										
34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4										
35	Br	2	2	6	2	6	10	2	5										
36	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6										
37	Rb	2	2	6	2	6	10	2	6			1							
38	Sr	2	2	6	2	6	10	2	6			2							
39	Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2							
40	Zd	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2							
41	Nz	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1							
42	Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1							
43	Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	6		1							
44	Ru	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1							
45	Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1							
46	Pd	2	2	6	2	6	10	2	6	10									
47	Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1							
48	Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2							

1	2	3	4	5	6	7	8	9
49	In	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
50	Sn	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
51	Sb	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
52	Te	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
53	J	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
54	Xe	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
55	Cs	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6		
56	Ba	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6	1	
57	La	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6	2	
58	Ce	2	2 6	2 6 10	2 6 10 2	2 6 1	2	
59	Pr	2	2 6	2 6 10	2 6 10 3	2 6	2	
60	Nd	2	2 6	2 6 10	2 6 10 4	2 6	2	
61	Pm	2	2 6	2 6 10	2 6 10 5	2 6	2	
62	Sm	2	2 6	2 6 10	2 6 10 6	2 6	2	
63	Eu	2	2 6	2 6 10	2 6 10 7	2 6	2	
64	Gd	2	2 6	2 6 10	2 6 10 9	2 6 1	2	
65	Tb	2	2 6	2 6 10	2 6 10 10	2 6	2	
66	Dy	2	2 6	2 6 10	2 6 10 11	2 6	2	
67	Ho	2	2 6	2 6 10	2 6 10 12	2 6	2	
68	Er	2	2 6	2 6 10	2 6 10 13	2 6	2	
69	Tu	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6	2	
70	Yb	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6	2	
71	Lu	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 1	2	
72	Hf	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 2	2	
73	Ta	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 3	2	
74	W	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 4	2	
75	Re	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 5	2	
76	Os	2	2 6	2 3 10	2 6 10 14	2 6 6	2	
77	Ir	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 7	2	
78	Pt	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 8	2	
79	Au	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	1	
80	Hg	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2	
81	Tl	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 1	
82	Pb	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 1	
83	Bi	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 3	
84	Po	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 4	
85	At	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 5	
86	Rn	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	
87	Fr	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	1
88	Ra	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	2
89	Ac	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	2

ҳаммаси Менделеев жадвалида бир катакка жойлаштирилган бўлиб, лантанидлар деган умумий ном остида юритилади.

Элементларнинг фақат химиявий хоссаларига асосланиб уларнинг даврий системасини тузган Д. И. Менделеевнинг якунлаш қобилиятига қойил қолса арзийди. Ахир Менделеев замонасида квант сонлари, энергетик сатҳлар ва шунга ўхшаш ҳозирги замон фанининг дурдоналари маълум эмас эди.

Исталган атомдаги исталган электронга энергия бериб уни юқоридаги бўш ўринга кўтарнш мумкин. Агар, аксинча пастга

туширсак, энергия кванти фотон нурлайди. Агар электрон пастки қобиқларининг биридан олинган бўлса, уни жойига қайтариш кучли энергия ва частотага эга бўлган рентген фотонларининг нурланишига сабаб бўлади. Электрон юқори қобиқлардан энг пастки К-қобиққа ўтганда кучли рентген нурлари ҳосил бўлади.

Ядродан узоқ бўлган қобиқлар ўртасидаги ўтишлар кўринадиган ёруғлик ёки кўринувчи спектрга яқин бўлган фотонларнинг нурланишига сабаб бўлади.

Электронларнинг пастки қобиқлардан юқори ва, аксинча, мумкин бўлган ўтишини танлашнинг бир неча қоидалари бор. Бу қоидалар у ёки бу ўтишларнинг мумкинлигини чуқур анализ қилиш асосида квант механикасидан келтириб чиқарилади.

Биз бу қоидалардан асосийсини келтириб, унинг физик маъносини кўриб чиқмоқчимиз.

Орбитал момент ± 1 га ($\Delta L = \pm 1$) ва у билан бирга ҳаракат миқдорининг тўла моменти (орбитал ва спин моментларининг йиғиндиси) ҳам ± 1 га ўзгарганида ёки тамоман ўзгармаганида электронлар бир қобиқдан иккинчисига ўтиши мумкин. Орбитал ва тўла моментлари ўзгариши ± 1 дан ортиқ ёки орбитал момент ўзгармайдиган ҳолда электронларнинг ўтиши қатъиян ман қилинган.

Фотоннинг ҳаракат миқдори моменти бирга тенглиги ва фотоннинг ютилиши, нурланишида бошқа реакциялардагидек ҳаракат миқдори моменти сақланиш қонунининг бажарилиши лозимлигини эсласак, квант тақиқлашларга тушуниш осонлашади.

Спини бирга тенг бўлган фотон атомдан нурланиши вақтида спини билан атомнинг сўнгги ҳолатдаги ҳаракат миқдорининг тўла моментига нисбатан параллел, антипараллел ва перпендикуляр йўналишда бўлиши мумкин. Агар фотон спини атомнинг сўнгги ҳолатдаги моментига параллел бўлса, ҳаракат миқдори моментининг сақланиш қонуни бажарилиши учун сўнгги ҳолатдаги момент бошланғич ҳолатдаги моментдан кам бўлиши лозим. Бу ҳол фотонларнинг нурланиш процессида орбитал моментнинг бирга камайиши ҳисобига бўлади. Фотон спини атомнинг сўнгги ҳолати моментига нисбатан антипараллел йўналишда бўлса, юқоридаги сабабга кўра сўнгги ҳолатдаги тўла ва орбитал момент бошланғич ҳолатдагидан бирга ортиқ бўлиши лозим. Ниҳоят, фотон спини атомнинг сўнгги ҳолати моментига перпендикуляр бўлса, фотонлар нурланиши вақтида тўлиқ момент ўзгармаслиги керак. Аммо орбитал момент бирга камаяди (фотон ҳосил бўлиши учун қаердандир бирга тенг бўлган момент олиш керак-ку, ахир). Лекин орбитал момент камайиши билан тўла момент камаймайди, чунки нурланиш процессида электрон спини антипараллел ҳолатдан параллел ҳолатга ўзгаради. Шунинг учун умумий момент бирга ортади. Бу ҳол тўла моментнинг таркибий қисми бўлган орбитал момент камайишини қоплайди.

10 §. КЎП ЭЛЕКТРОИЛИ АТОМЛАРНИНГ СПЕКТРЛАРИ

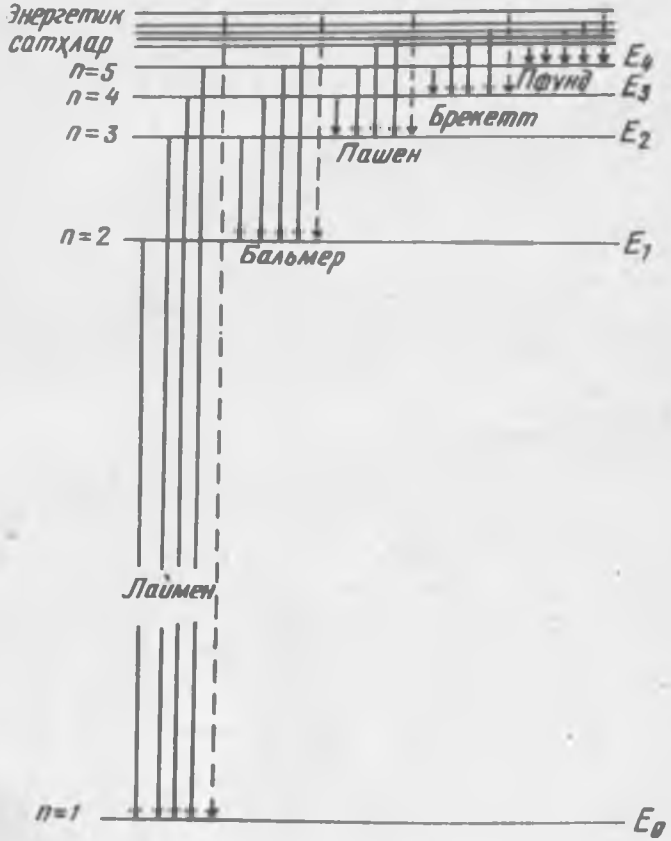
Чизиқли спектрларни ўрганиш атомларнинг ядро моделини яна бир марта тасдиқлаб берди.

Чизиқли спектрлар атом электрон қобиқларининг тузилишини кўрсатади. Ҳар бир атом спектрида ўзига хос қонуниятлар бор. Электрон бир ҳолатдан (n_2) иккинчи ҳолатга (n_1) ўтганда электромагнит тўлқинлар тарқалади ($n_2 > n_1$) ва унинг частотаси

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \qquad (14)$$

билан аниқланади.

Атомнинг энергетик сатҳларн 4-расмда кўрсатилган. Горизонтал чизиқлар энергия сатҳларини кўрсатади. n-сатҳга (E_n) энергия пропорционал бўлади. Чизиқлар ёнига энергия E_n ҳамда квант сонлари n ёзилади. Тик чизиқлар уйғонган атомдаги электрон ўтишларини кўрсатади. Электронлар K-қатламга ўтганида K серияли, L-қат-



4- расм. Атомнинг энергетик сатҳлари.

ламга ўтганида L серияли нурлар чиқади ва ҳоказо. K-серия K_α, K_β ва ҳоказо, L-серия L_α, L_β ва ҳоказо чизиқларидан ташкил топган бўлади.

Водород атоми учун назария билан тажрибанинг мос келиши Бор пастулотларининг тўғри эканлигини кўрсатди.

Лекин кўп электронли атомлар спектрлари мураккаб тузилишга эга. Бу мураккаблик электрон қобиқларнинг ядродан узоқлашиши туфайли электронларни экранланишидан (бекитилишидан) келиб чиқади. Электронлар ички қобиқларга ўтганида атом рентген нурлари чиқаради. Оптик спектрлар эса, ташқи қобиқлар орасидаги электрон ўтишлар натижасида ҳосил бўлади ва ультрабинафша, оқ ёруглик ҳамда инфрақизил нурлардан ташкил топади.

Электронлар экранланишининг оптик ҳамда рентген спектрларига таъсирини кўриб чиқайлик. Ядро билан ташқи қатлам электронлари кучсиз богланган бўлади. Унга ядронинг эффектив заряди e таъсир этади. Ядронинг қолган заряди эса, $(Z-1)$ электрон билан нейтраллашади. Шунинг учун оптик спектрнинг хоссалари деярли бутунлай ташқи қатламнинг тузилиши билан аниқланади ва элементнинг тартиб номери Z га боғлиқ бўлмайди. Ташқи қобиқ тузилиши даврийликка эга бўлганлигидан оптик спектр хоссасида ҳам даврийлик бор. Масалан, ишқорий металлар атомларининг ташқи қобиғида фақат битта электрон бўлади. Уларнинг частота чизиқлари спектрнинг кўзга кўринадиган қисмида бўлиб, бир ишқорий элементдан иккинчисига ўтганда кам ўзгаради. Оптик спектрда частота элементнинг тартиб номерига кескин боғлиқ эмас.

Рентген нурларининг частоталари бошқача ўзгаришга эга. Рентген спектри чизиқларининг частоталари ядронинг зарядига кескин боғлиқ. K- ва L-қобиқлар электронларига ядронинг эффектив заряди $(Z-1)l$ таъсир этади. K_α-чизиқларининг частоталари Н. Бор назариясига асосан $n_1=1$ ва $n_2=2$ бўлганида Лайман серияси формуласини $(Z-1)^2$ га кўпайтириш йўли билан топилади

$$\nu = \frac{3}{4} R (Z-1)^2, \qquad (15)$$

бунда R — Ридберг доимийси.

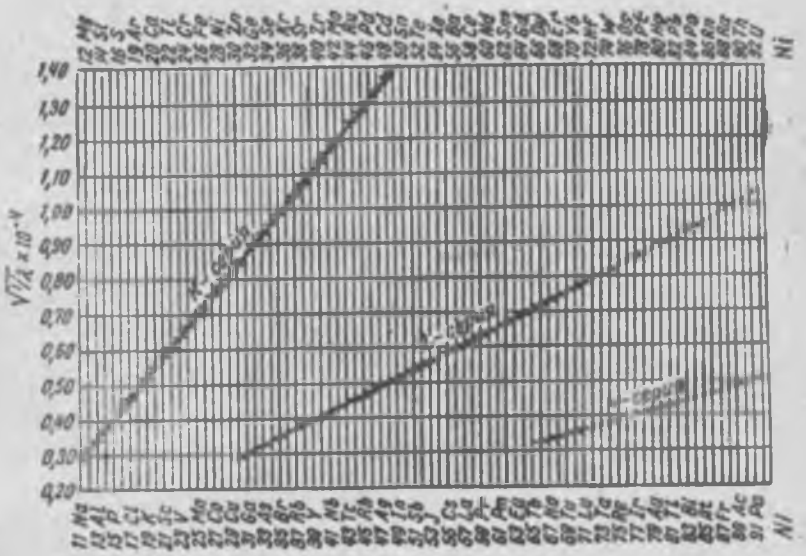
Ядро заряди $Z \gg 1$ бўлганида K_α-чизиқларининг частоталари Z^2 га пропорционал ортиб боради. Шундай қилиб, атом номери ортиши билан рентген спектрида оптик спектрдаги хоссаларнинг даврий такрорланиш ҳодисаси рўй бермайди.

(15) формуладан илдиз олсак

$$\sqrt{\nu} = \sqrt{\frac{3}{4} R}(Z-1)$$

бўлади, яъни K_α-чизиқлар частотасининг илдизи Z нинг чизиқли функцияси экан. Буни эксперимент йўли билан биринчи марта 1913 йилда инглиз физиги Мозли топган ва уни Мозли қонуни

деб юритилади. Элементларнинг K_α чизиқларининг частоталарини тажрибада ўрганиш (Мозли қонуни асосида) ядролар зарядини аниқлаш имконини берди. 5-расмда $\sqrt{\nu} = \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$ нинг K, L ва M-сериялар учун атом номери Z га боғлиқлигининг умумий кўрини-



5- расм. Мозли қонунини ифодаловчи боғланишнинг кўриниши.

ши келтирилган. Частотанинг Z га боғлиқлиги бошқа усуллар билан аниқланиши қийин бўлган элемент атом номерини аниқлашда катта аҳамият касб этди. Масалан, бунга асосан Менделеев жадвалидаги катакларга лантанидлар (сийрак ер элементлари) тўғри жойлаштирилганини текшириш мумкин, аммо уларнинг химиявий хоссаларига асосланиб, бу ишни қилиш мумкин эмас.

Рентген спектрида ҳар бир элемент чизиқларининг ўзига хос ўрни бор. Рентген спектрининг тузилиши ички электронлар қобиғининг хоссаларига боғлиқ равишда атомнинг характеристикасини ҳам англатади. Шунинг учун элемеитларнинг чизиқли рентген спектри характеристик спектр деб юритилади.

Шундай қилиб, Бор назарияси водород атомини, кўп электронли атомларининг чизиқли спектрларини, Менделеев жадвалини, Мозли қонунини асослаб берди ва тушунтирди. Нима учун атом ичидаги ҳаракат Бор постулатларига бўйсуниши керак? Бор бу постулатларни фанга исботсиз киритди, олинган натижалар тажрибада исботланди. Атом тузилишини назарий жиҳатдан ўрганиш квант механикаси юзага келгандан сўнг давом этди ва юқоридаги саволларга жавоблар топилди.

II боб

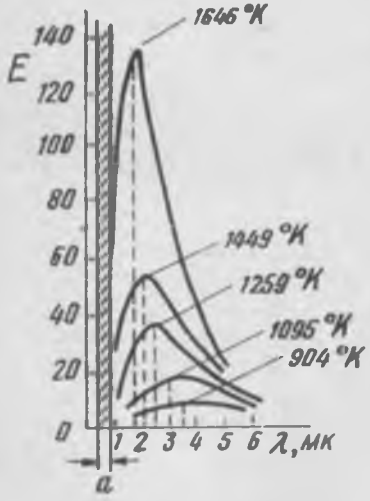
ЯДРО ИЧИДА

11-§. КВАНТ МЕХАНИКАСИ

Асримизнинг бошида классик физика атом физикасидаги янги кашфиётлар натижасида «қатор зарбалар»га дуч келди. 1900 йили Планк иссиқлик чиқариш ҳодисаларининг баъзи хоссаларини тушунтириш бўйича квант назариясини ишлаб чиқди. Ҳозир бу назарияни «тўлқин механикаси», «квант механикаси» деб аталади.

Планк ўрганаётган проблема қиздирилган жисмдан чиқаётган иссиқлик энергиясининг тўлқин узунлиги бўйича тақсимотига тааллуқли эди. Аввалларн энергия ҳар қандай берк ҳажмли жисм ичида муайян температурада барча тўлқин узунликлари бўйича бир хил тақсимланади ва у жисм деворларининг хоссаларига боғлиқ бўлмайди, деб юритилар эди.

Энергиянинг абсолют шкала бўйича тақсимланиши 6- расмда кўрсатилган. Кўриниб турибдики, юқори температурада эгри чизиқ чўққиси қисқа тўлқинлар соҳасида бўлиб, кўринадиган ёруғлик тарқалган соҳани ҳам эгаллай бошлайди. Эгри чизиқ бўйича чўққилар турли температурада ингичка пунктир чизиғи билан кўрсатилган.



6- расм. Қора жисм нурланиш спектридаги энергия тақсимоти (*a* — кўринувчи ёруғлик соҳаси).

Биз ўқувчиларга Планк назариясини батафсил тушунтириб бериш имкониятига эга эмасмиз. Классик назарияга кўра, тўлқин узунликлари бўйича энергия тақсимланишини ифодаловчи эгри чизиқда чўққилар бўлиши мумкин эмас, балки у ўта қисқа тўлқинлар томон чексиз ўсиши лозим. Планкнинг янги қоидасига биноан тебранма манба, масалан атом, узлуксиз ўзгариб турмайди, балки $h\nu$ га каррали бўлган маълум миқдорларгагина эга бўла олади (бунда ν — тебраниш частотаси; h — барча турдаги тебранишлар учун

доимий бўлган универсал константа — Планк доимийси номи билан машҳур). Кейинчалик Планк нур тарқалиши ёки ютилиши икки «энергетик сатҳ» ўртасида электрон сакраш йўли билан кечади деган фикрни айтди. Агар сакраш юқори сатҳдан пастки сатҳга томон йўналса, нур сочилади. Агар электрон пастки сатҳдан юқорига томон сакраса, нур ютилади.

Мазкур қоидаларга таяниб, Планк 6-расмда тасвирланган эгри чизиққа тўғри келадиган қилиб, мавжуд назарияни ўзгартирди. Янги назариянинг тўлиқ муваффақиятга эришиши эмпирик фазаларнинг революцион характери туфайли кишиларни ғоят ажаблантирди. Икки қўшни энергетик сатҳ ўртасидаги сакраш ёки ўтиш энергиясининг маълум миқдорини (ё «квант»-ни) чиқариш ёхуд ютиш билан бирга кечади. Бундан чиқадики, нурлар импульс билан тарқалар экан. Бундай тахмин шу давргача ҳукм суриб келган ёруглик ва бошқа электромагнит нур тўлқинлари узлуксиз қатор тарзда тарқалади, деган қарашларга мувофиқ келмасди, албатта.

Эйнштейн нисбийлик принципи ҳақидаги мақоласи босилишидан бир неча ой муқаддам модда билан электромагнит нур сочилиши ўртасида энергия алмашиниши импульслар ёки энергия кванти ёрдамида юз беради деб тахмин қилиш учун бошқа маълумотлар ҳам мавжудлигига эътибор берди. Бу маълумотлар фотоэлектрик эффект тадқиқотларидан келиб чиқади. Энергия кванти ($h\nu$) да энергия алмашиниши содир бўлганлигига шубҳа ҳам қолмади.

Яна чалкашлик: ёруғлик корпускуляр хоссаларга эга бўлса ҳам, бироқ ёруғлик корпускуласи энергиясини ёки «фотон»ини аниқлаш учун уни зарурий узунликка ва частотага эга бўлган тўлқин сифатида тасаввур қилиш керак эди. Ёруғликнинг тўлқин хоссалари ҳақидаги барча маълумотлар шунда ҳам ўз кучини йўқотмади.

Бироқ ёруғликнинг корпускуляр хоссалари, ҳар ҳолда тасодиф эмас эди, чунки ҳар қандай сиртга тушган ёруғлик унга ўзининг «ёруғлик босими» билан таъсир этиши маълум эди. Бу тажрибада аниқланган бўлиб, термодинамика, электромагнитизм ва нисбийлик назариясида катта аҳамиятга эга.

Кейинги муҳим кашфиёт баъзи элементларнинг характерли спектрларини таҳлил қилишга асосланади. Агар спектроскоп ёрдамида, масалан, водород разряди текшириладиган бўлса, унда ҳосил бўлган спектр тўхтовсиз алмашиниб турувчи рангга эга бўлмай, балки маълум узунликдаги тўлқинларга ёки рангларга эга бўлган муайян миқдордаги ёруғ чизиқлардан ташкил топади. Турли элементлар спектрининг кўпгина қонуниятлари олдиндан сезилган бўлса-да, бироқ 1885 йилга келиб, Бальмер водород чизиқларининг тўлқин узунликларини оддий эмпирик формулада ифодалаш мумкинлигини аниқлади. Бу проблемани ҳал этиш батамом назариётчилар зиммасига тушди.

Атом осцилляторлари ҳисобига нурланиш юз беради деган қоида назариянинг асосий гояси бўлди. Атом тузилиши ҳақидаги тушунчанинг кенгайиши ва чуқурлашуви атом ядроси атрофида айланувчи электрон ҳам айнан шундай осциллятор бўла олади, деган фикрга олиб келади. Сабаби, манфий зарядниг мусбат заряд атрофида айланиши айланиш частотасига тенг частотали нурланиш билан бирга кечади. Лекин айни вақтда мушкуллик ҳам тугилади. Энергиянинг нурланишга сарфланиши шунга олиб келадики, электрон «спирал» бўйича узлуксиз ортиб борувчи айланиш тезлиги билан ядрога яқинлашмоғи лозим эди. Бундай бошланғич қоидага асосланиб, характерли частотадаги нурланишни ва атом барқарорлигини тушунтириш оғир.

Мураккаб проблемаларни ечишда Боринг хизматлари катта. У 1913 йилда тури ва мазмуни жиҳатидан Планкнинг дастлабки назариясига ўхшаш қатор асосий қоидаларни ишлаб чиқди. Унинг фикрича, электрон ядро атрофида қатъий масофада энергия тарқатмасдан айланади.

Электрон бир орбитадан иккинчи орбитага ўтиш жараёнидагина нур тарқалиши ёки ютилиши мумкин. Нурланиш частотаси ν қуйидагича ифодаланади:

$$E = h\nu,$$

бунда E — «квант сатҳи» ёки «квант ҳолати» деб аталувчи иккита сатҳ энергияси орасидаги айирма, h — Планк доимийси.

Атом нормал ҳолатда бўлганида электрон энергетик жиҳатдан энг «қуйи» орбитани эгаллайди. Лекин нур ютилиши уни юқори энергияли орбитага ўтказади, бошқача айтганда, атом «уйғонган ҳол»га келади. Электроннинг бошқа атомлар билан тўқнашувн туфайли юқорн температурада кўп атомлар «уйғонган ҳол»га келади ва паст энергетик ҳолатга ўтиши ҳисобига энергия чиқаради.

Энди атом ўзи нурлата оладиган частотадаги нурланишнигина юта олишининг, яъни нурланиш спектрининг ютилиш спектри «негативи»га аниқ ўхшашлигининг боиси маълум бўлди. Ҳақиқатан ҳам бу барча нур тарқатувчилар (осцилляторлар) учун умумий бўлган хоссалардир. Масалан, созланган скрипка торлари олдида унга мос келадиган нота чалинса, бунга жавобан торлар тебранади ёки «резонанс» юз беради, шу туфайлп маълум миқдорда товуш энергияси чиқади ёки ютилади.

Классик механика ва электростатика принциплари ҳамда янги қоидалар асосида Нильс Бор водород спектрининг асосий чизиқларига тааллуқли. барча ҳодисаларни батафсил шарҳловчи математик назарияни ишлаб чиқди. Кейинроқ бошқа спектрлар ҳам изоҳланди ва спектрнинг «нозик структураси» ҳақидаги масала, яъни спектр асосий чизиқларининг бир-бирига жуда яқин бўлган чизиқ группаларига «ажралиши» масаласи муваф-

фақнятли ҳал этилди. Масалан, нисбийлик назариясида айтилганидек, электрон массасининг тезликка боглиқ равишда ўзгариши нозик структуранинг баъзи хусусиятларини изоҳлайди.

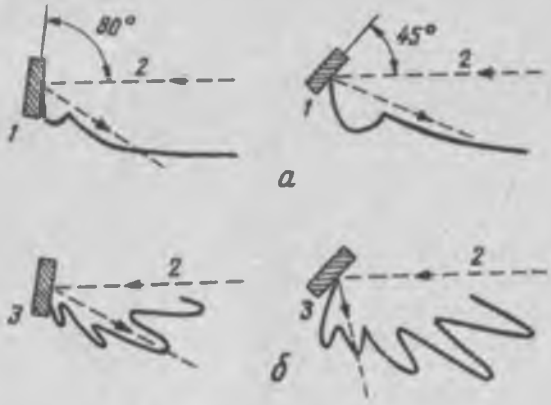
Ўтказилган бошқа тажрибалар ҳам квант ҳолатининг мавжудлигини таъкидловчи кўпгина далилларни келтириб чиқарди.

12-§. ФОТОН ТЎЛҚИНМИ ЁКИ ЗАРРАМИ?

Радикал характерга эга бўлган асосий қондалар татбиқи мавжуд бўлган чалкашликларга чек қўйди. Шунга қарамай, бу асосий қоидалар қўпол бўлиб, бошқа физик қарашлар билан етарли даражада боғланмаган деган фикрлар ҳам йўқ эмас эди. Физик ғоялар (Луи де-Бройль, Шреднигер, Дирак, Гейзенберг ва бошқаларнинг назариялари) тараққиёти барча квант ҳодисаларини шу даража тўлиқ таҳлил қилишга олиб келдики, бунинг натижаси ўлароқ, физикларнинг сўнгги шубҳаларига барҳам берилди. Мазкур назариялар ҳозирги замон тўлқин механикасида тўла ифодасини топди. Де-Бройлнинг, агар ёруғлик маълум корпускуляр хоссаларга эга бўлса, корпускулялар, масалан, модда зарралари ҳам тўлқин хоссаларига эга бўлиши лозим, деган тахминий масаланинг тугуни эди.

Хўш, шундай экан, фотон тўлқинми ёки заррами? Аниқланишича тўлқин ҳам, зарра ҳам экан. Фотон тинчлик массага эга эмас ва унинг катталигини ўлчаб бўлмайди.

1927 йили америкалик Дэвиссон ва Жермер, англиялик Жорж Пажет Томсон электрон дифракциясини кашф этиб, де-Бройль гипотезасини тасдиқладилар. Тез электронларнинг жуда юпқа металл пластинкадан ўтишини тешик ёки тирқишдан ўтаётган нурга ўхшатиш мумкин эканлиги аниқланди. (7-расм).



7-расм. а — электронларнинг никель пластинкадан сочилиши; *б* — электронларнинг монокристаллдаги дифракцияси;

1 — пластинка, *2* — электрон оқими, *3* — кристалл.

Кейинроқ протон, нейтрон, атом каби зарраларда ва, ҳатто, молекулаларда ҳам дифракция ҳодисаси мавжудлиги аён бўлди.

Бу муҳим воқеа эди, албатта. Ҳатто, тўлқинли материя корпускуляр назарияси ва корпускуляр материя тўлқин назарияси каби бир-бирига зид бўлган назариялар ҳам ягона квант механикасига бирлашди. Бу бирлашиш шундай янги хусусият яратдики, бусиз элементар заррани шарҳлаб бўлмайди. Бу корпускуляр — тўлқин «иккиланиш» ёки элементар зарралар дуализмидир. Элементар зарралар том маънодаги зарралар бўлмай, балки айни вақтда ҳам зарра, ҳам тўлқиндир.

Ниҳоят, микродунё тартиблашгандек бўлди. Бироқ бу ажойиботлар қуршовидагина тартиб эди, холос. Де-Бройль, Шредингер, Дирак ва Гейзенбергларнинг ғоялари жуда ҳам радикал ғоялар эди! Микродунё объектидаги хоссалар макродунё хоссаларига ҳеч ўхшамасди.

Даставвал, гўё ҳаракатдан ажратиб бўлмайдиган траектория каби тушунчадан узоқлашишга тўғри келди. Отилган тош парабола бўйлаб йўналади. Қаттиқ урилган биллиард шарининг йўли қанчалик мураккаб бўлмасин (у стол бортига ҳамда бошқа шарларга урилиб, лузага тушади), уни кузатиш мумкин. Броун ҳаракатини тасвирловчи тажрибада ҳатто гул чанги ҳам ўзининг ягона траекториясига эга бўлади.

Квант механикаси қонунига кўра ҳаракатланувчи элементар зарралар аниқ траекторияга эга эмас. Агар «электрон» ёки «протон» деганда онгимизда жуда кичкина шарча, зарра ҳақида фикр туғилса, буни тасаввур қилиш мушкул, албатта. Бироқ зарра дуализми, уларнинг тўлқин хусусиятларини назардан чиқармаслик керак. Траектория корпускуляр объектга ва макрожисмларгагина хосдир. Чексиз масофага тарқаладиган ва, ҳатто, жисм эмас, балки физик жараёндангина иборат бўлган тўлқинлар траекторияга эга бўлмайди, албатта. Микродунё зарраларида ҳам корпускуляр, ҳам тўлқинли хоссалар мавжуд.

Агар юпқа пластинка электронлар оқими эмас, балки якка-якка электронлар «ўқига» тутилса, ажойиб манзара вужудга келади. Пластинка орқасига ўрнатилган экраннинг турли ерларида электронлар ёруғ доғ ҳосил қиладн ва у ерда электронлар мавжудлигини билдиради. Демак, электронлар зарра сингари экранга урилади. Агар уларнинг қандай тақсимланишини кузатсак, электронлар экранда тўлқин қонунияти бўйича жойлашишини кўриш мумкин.

Микродунё объектида шунчалик қарама-қаршн корпускуляр тўлқин хоссалари таҳлилини механик тарзда тушуниш ярамайди. Айни бир вақтдаги зарра ва тўлқинлар корпускула ҳам эмас, тўлқин ҳам эмас, балки ҳар иккисининг диалектик бирлигидир.

Микрожисмларнинг макон ва замондаги ҳаракатини механик ҳаракат билан мутлақо тенглаштириб бўлмайди. Масалан, элементар зарранинг фазодаги ҳолатини координат системаси воси-

тасида ҳар минутда аниқлаш мумкин эмас, ўзимиз ўрганиб қолган жисмларда эса буни ҳар доим ҳам амалга оширса бўлади.

Микрозарралар ҳаракати ўзига хос алоҳида қонда бўйича бўлади ва тўлқин функцияси билан характерланади.

Юқорида айтиб ўтилган австриялик физик Эрвин Шредингер де-Бройль назарияси асосида микрозарралар ҳаракати назариясини (уларнинг тўлқин хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда) яратди. У вақтга боғлиқ ҳолда микросистема ҳолатининг ўзгаришини ифодаловчи ва ҳар қандай шароитда унинг тўлқин функциясини аниқлашга имкон берувчи тенгламани ишлаб чиқди.

Вақтни ўз ичига олган Шредингер тенгламасининг умумий кўриниши қўйидагича:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi = -\frac{\hbar}{i}\frac{\partial\psi}{\partial t},$$

бундан

$$\psi = \psi_0(x,\ y,\ z)\cdot e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$$

Шредингер тенгламасини ечганда дастлабки ҳолат бўйича, фазонинг берилган нуқтасида маълум вақтда зарранинг мавжуд бўлиши эҳтимоллигини аниқлаш мумкин.

Ньютон қонунлари классик физика учун қанчалик аҳамиятли бўлса, Шредингер тенгламаси ҳам микродунё учун шунчалик аҳамиятга эгадир. Шунга асосланган ҳолда Вернер Гейзенберг квант механикасининг асоси бўла оладиган ажойиб хулоса чиқарди.

Оддий нарсалар — тош, велосипед, автомобиль, учаётган самолёт ва шу кабилар хусусида ҳаракат қонунини жуда бўлмаганда назарий жиҳатдан татбиқ этишимиз мумкин. Бунинг учун икки миқдор: жисмнинг фазодаги ўрни ва импульсигина талаб этилади.

Микродунёда эса бутунлай бошқача. Бунда элементар зарраларнинг ҳам ўрнини, ҳам импульсини айни бир вақтда аниқ ўлчаб бўлмайди. Маълум бўлишича, зарранинг ўрни ва импульсини ўлчашда йўл қўйиладиган — хатолар камида Планк доимийси — h нинг 2π га нисбати ($\hbar$) га тенг бўлиши керак. 1927 йили Гейзенберг томонидан аниқланган ноаниқликлар принципини қуйидагича ифодалаш мумкин: координат ва импульс ноаниқлигининг кўпайтмаси $\hbar$ га тенг ёки ундан ортиқроқ. Зарралар ўрнини ёки уларнинг импульсини ҳар хил аниқлик билан белгилаш мумкин. Бироқ параметрлардан бири қанча аниқ ўлчанса, иккинчисини ўлчашда ўшанча катта хатоликка йўл қўйилади. Вақт ва энергия ҳам микросистемаларда худди шундай нисбатдадир.

Элементар зарралар табиатининг икки ёқламалиги, улар ҳаракатининг ноаниқлиги — буларнинг ҳаммаси ўрганилган қонунлардан фарқ қилиб, одатдаги нарсаларга зид бўлганлиги-

дан физикадан хабари бўлмаган ва диалектик материализмни яхши билмаган кишиларнинг асабини қўзгата бошлади. Шунинг учун гўё ирода эркига эга бўлган элементар зарраларга хос «жон» ҳақида фикрлар пайдо бўлди.

Зарраларнинг ғайри оддий хусусиятлари, улар тобе бўлган, аллақандай қонунлар — классик физикада номаълум бўлган ва микродунё ҳодисаларини аниқловчи қандайдир сабаблар мавжудлигидан дарак беради. Лекин микрозарраларни тирик организм билан тенглаштириб, уларда ақл ҳосил қилиш учун ҳеч қандай асос йўқ эди.

Микродунё ҳодисаларини ўрганиш элементар зарралар ҳаракатини бошқарувчи «статистик» сабабнятнинг янги формасини кашф этишга олиб келди.

13-§. АТОМНИНГ ЯДРО ТУЗИЛИШИ

1903 йилда инглиз олими Ж. Ж. Томсон томонидан таклиф қилинган атом моделига биноан, атом мусбат электр заряди билан ҳар хил зичликда тўлдирилган шардан иборат бўлиб, электронлар ўша мусбат электр «булутида» сузгандек ҳаракатланади. Шарнинг мусбат заряди миқдори электронлар заряди йиғиндисига тенг бўлиб, атом бутунлай нейтрал бўлади. Атомнинг ёруғлик чиқариши электронларнинг мувозанат ҳолатлари атрофида жуда кичик тебранишлари натижаси деб қаралади. Бироқ кейинчалик бу моделнинг асоссизлиги аниқланди. Шунинг учун ҳозирги вақтда у фақат атом тузилиши ҳақидаги тушунчаларни ривожланиш босқичларидан бири сифатида тарихий аҳамиятга эга.

Атомдаги мусбат ва манфий зарядларнинг тақсимланиш характерини билиш учун тажрибада атомнинг ички соҳаларини синчиклаб «пайпаслаб» кўриш зарур эди. Бундай синчковлик машҳур инглиз физиги Эрнест Резерфорд ва унинг ходимлари томонидан α- зарра модданинг юпқа қатламидан ўтаётганда, унинг йўналиши ўзгаришини — сочилишини кузатиш билан амалга оширилди.



8-расм. Резерфорд тажрибасининг схематик кўриниши.

1 — радиоактив радий, *2* — α-зарралар, *3* — экран, *4* — қўрғошин «уйча», *5* — юпқа пластинка, *6* — сочилган α-зарралар.

Альфа-зарра баъзи элементларнинг радиоактив парчаланиши натижасида катта тезлик (энергия) билан ажралиб чиқувчи гелийнинг икки марта ионлашган атомлари эканлиги 1909 йилда тажрибалар асосида исботланган эди.

Резерфорд тажрибалари тубандагича амалга оширилди (8-расм). Қўрғошиндан ясалган «уйча» 4 ичида α-зарра манбаи бўлган радиоактив модда 1 жойлаштирилган. Уйча кичик дарчага эга бўлиб, ундан α-зарралар дастаси 2 чиқади. Даста йўлига металл фольга 5 қўйилган бўлиб, ундан ўтаётган α-зарралар ўзларининг бошланғич ҳаракат йўналишини турли бурчак остида ўзгартиради. Рух сульфит билан қопланган экранга α-зарраларнинг урилиши натижасида ҳосил бўлган сцинтилляция (чақнаш) процесси микроскоп орқали кузатилди. α-зарралар ўз йўлида ҳаво молекулаларига тўқнашиб секинлашмасин учун бутун асбобни ҳавоси сўриб олинган идиш ичига ўрнатилди.

Натижада, баъзи α-зарралар жуда катта бурчакка оғган. Тажриба натижаларидан, Резерфорд α-зарраларнинг бундай катта бурчакка оғиши атом ичида жуда кичик ҳажмга тўпланган ва катта массага эга бўлган ниҳоятда кучли электр майдони мавжуд бўлгандагина содир бўлиши мумкин, деган хулосага келди. Бу хулосага асосланиб, Резерфорд 1911 йилда атомнинг ядро моделини таклиф этди. Резерфорд таклифига кўра, атом зарядлар системасидан иборат бўлиб, унинг марказида Ze мусбат зарядга эга бўлган, ўлчами 10^{-12} *см* дан катта бўлмаган оғир ядро жойлашган ва унинг атрофида атомнинг бутун ҳажми бўйича тақсимланган Ze та электрон жойлашган. Атомнинг деярли ҳамма массаси ядрода тўпланган.

Резерфорд ўз фаразига асосан α-зарралар сочилишининг миқдорий назариясини ишлаб чиқди ва зарраларнинг бурчак бўйича тақсимланишини ифодаловчи формулани келтириб чиқарди. Бу формулани келтириб Резерфорд қуйидагича фикр юритди. Альфа-зарраларнинг бурилиши уларга атом ядролари томонидан бўлаётган таъсир билан боғлиқдир. α-зарра билан электронларнинг ўзаро таъсир этиши натижасида сезиларли бурилиш рўй бериши мумкин эмас, чунки электрон массаси α зарра массасидан тахминан 7,5 минг марта кичик. α-зарра яқинидан учиб ўтаётганда унга кулон итариш кучи таъсир қилади, яъни

$$f = \frac{2e \cdot Ze}{r^2} = \frac{2Ze^2}{r^2},$$

бу ерда Ze — атом ядросининг заряди, $2e$ эса, α — зарраниг заряди. Бу ҳолда зарранинг траекторияси гиперболадан иборат бўлиб, унинг асимптоталари ўзаро α бурчак ҳосил қилади. Бу бурчак зарранинг бошланғич йўналишидан бурилишини характерлайди.

Резерфорд ҳисоблари шуни кўрсатдики, фольгага туша-

ётган N та α-заррадан $d\Omega$ фазовий бурчак ичига ўз йўналишини φ бурчакка ўзгартирган

$$dN = n \cdot N \cdot \left(\frac{2Ze^2}{mv^2}\right)^2 \cdot \frac{d\Omega}{4\sin^4\frac{\varphi}{2}} \qquad (16)$$

та α-зарра тушар экан, бу ерда m — α-зарра массаси, v—уларнинг тезлиги. (16) дан кўриниб турибдики, Резерфорд тажрибаси учун кўпайтма

$$\frac{dN}{d\Omega}\ \sin^4\frac{\varphi}{2} = const,$$

яъни бурчак φ га боғлиқ эмас.

Резерфорднинг α-зарралар моддадан ўтаётганида мусбат зарядга эга бўлган оғир зарраларнинг кулон кучи таъсирида сочилиб ўз йўлини ўзгартиради деган дастлабки тахмини тўғри эканлигини исботлайди. Сўнгги тажриба натижасида Кулон қонуни α-зарралар билан сочувчи зарралар орасидаги масофа 10^{-12} *см* гача бўлганда тўғри эканлиги аниқланди. Бундан маълум бўладики, атом ичидаги мусбат зарядланган марказий массалар (ядролар) атомнинг ниҳоятда кичик ҳажмини эгаллар экан.

Инглиз физиги Чадвик мис, кумуш ва платина учун Z нинг қийматини ўлчаб, бу элементлар ядроларининг заряди Z мис учун 29 ± 1, кумуш учун 46 ± 1 ва платина учун 78 ± 2 эканлигини аниқлади (ядро зарядлари электрон заряди бирлигида берилган).

Чадвик тажрибалари натижасини қунт билан ўрганган Ванден Брук элементларнинг ядро зарядлари қиймати Менделеев жадвалидаги уларнинг эгаллаган ўрнининг тартиб сонига тўғри келишини пайқади. Ҳозирги вақтда Ван-ден Брук гипотезаси тасдиқланган: Менделеев жадвалида элементлар ўрнини уларнинг атом оғирликлари эмас, балки ядро заряди қиймати, атом номери белгилайди. Менделеев жадвалидаги бир элементдан иккинчи элементга ўтилганда, унинг атом ядроси заряди бирга ўзгаради. Атом номери ҳам муайян элементнинг химиявий хусусиятини билдиради.

Альфа-зарра билан атом ядроси орасидаги ўзаро кулон таъсиридан келиб чиққан бу назариянинг тўғрилиги, α-зарра ҳатто тескари йўналишда қайтариб ташланганида ҳам уни атомнинг мусбат заряд соҳасига кира олмаслигидан далолат беради.

Шу билан бирга ядро томонга тўғри, аниқ йўналишда учиб бораётган α-зарра, унга шундай масофада яқинлашадики, уни α-зарранинг бутунлай тўхтаган пайтдаги потенциал энергиясини кинетик энергиясига тенглаштириб топиш мумкин:

$$\frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} = \frac{2Ze^2}{r_{min}},$$

r_{min} — зарра билан ядро марказлари орасидаги энг кичик масофа). Масалан, $Z = 10$, $v = 10^9$ *см/сек* ва $m_\alpha = 4 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24}$ *г* $= 6{,}6 \times \times 10^{-24}$ *г* бўлганда, r_{min} қуйидаги қийматга эга бўлади:

$$r_{min} = \frac{4Ze^2}{m_\alpha v_\alpha^2} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-12} \text{ см.}$$

Шундай қилиб, α-зарранинг сочилиши бўйича ўтказилган тажриба натижалари Резерфорд томонидан таклиф қилинган атомнинг ядро моделини маъқуллайди.

14-§. ЯДРО ЗАРЯДИ, МАССАСИ ВА ИЗОТОПЛАР

Ядронинг электр заряди мусбат ва элементар (электрон) заряд миқдори $e = 1{,}6021 \cdot 10^{-19}$ k га карралидир. Уни Ze кўпайтма кўринишида тасаввур қилиш мумкин. Шундай қилиб, берилган атомнинг Менделеев даврий системасидаги ўрнини билдирувчи атом номери Z ҳам муайян элементнинг химиявий хусусиятини билдиради.

Ҳозирги вақтда маълум ядроларнинг атом номерлари 0 дан 105 гача бўлган қийматларни қабул қилади. Нейтрон учун $Z=0$. водород учун $Z = 1$, гелий учун $Z = 2$ ва ҳоказо.

Электр заряди атом ядросининг асосий характеристикаларидан бири бўлиб, у нейтрал атомдаги электронлар сонини, химиявий, оптик ва бошқа физик хусусиятларни аниқлайди.

Атом ядросининг иккинчи муҳим характеристикаси унинг массасидир. 1962 йилгача массанинг атом бирлиги қилиб (1 м. а. б.) физик шкалада кислород ${}_8O^{16}$ изотопи массасининг $\frac{1}{16}$ қисми қабул қилинган эди.

1 м.а.б. $= \frac{1}{16}$ O^{16} массаси $= 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ $г = 931{,}15$ *Мэв*. Массанинг энергия орқали ифодаланишини $E = mc^2$ муносабатдан фойдаланиб топилган. 1962 йилдан бошлаб атом массасининг янги углеродли шкаласи қабул қилинган. Массанинг янги бирлиги қилиб углерод ${}_6C^{12}$ атоми массасининг $\frac{1}{12}$ қисми қабул қилинган. Массанинг янги бирлиги қисқача у.м.а.б. белгиланади ва атом массасининг халқаро бирлиги деб қабул қилинди.

$$\text{у.м.а.б.} = \frac{1}{12} C^{12}_6 \text{ массаси} = 931{,}48 \text{ } Мэв.$$

Химиявий шкаланинг атом массаси бирлиги учун кислород изотопларининг O^{16}—99,759%, O^{17}—0,037%, O^{18}—0,0204% аралашмаси массасининг 16 дан бир қисми қабул қилинган.

Ҳозирги вақтда атомлар массаси масс-спектрографлар ёрдамида жуда катта аниқликда ўлчанган.

Қобиқлардаги электронларнинг массаси ядро массасига нисбатан жуда кичик, шунинг учун ядронинг массаси атом массасига деярли мос келади.

Ҳозирги замон тасаввурларига кўра атом ядросининг таркибига протон ва нейтронлар киради. Шунинг учун бу зарралар нуклонлар деган умумий номга эга (латинча—ядро, мағиз).

Атом массаси бутун сондан бирмунча фарқ қилади. Ядронинг у.м.а.б. даги массасига эиг яқин бутун сон ядронинг масса сони A деб олинади. Масса сони жуда қулайдир, чунки у атом ядросидаги нуклонлар (протонлар ва нейтронлар) сонини билдиради. Берилган элемент атомининг ядроси шу элементнинг химиявий символи билан белгиланади ва символнинг ўнг томонида, юқорида масса сони қўйилади, чап томонида, пастда, ядронинг заряди Z ёзилади. Масалан углерод ${}_6C^{12}$ ядроси 12 та нуклонга эга бўлиб, протонлар сони 6 та. ${}_{11}Na^{23}$ ядроси 23 та нуклон бўлиб, бундан протонлар сони 11 та ва ҳоказо.

Шундай қилиб, атом ядроси таркибида Z протон ва $N=A-Z$ нейтронлардан иборат A нуклон бор. Бир хил электр зарядга (Ze), яъни протонлар сони бир хил, аммо масса сони турлича бўлган атом ядролари изотоплар деб аталади. Масалан, табиатда кислороднинг ${}_8O^{16}$, ${}_8O^{17}$, ${}_8O^{18}$ турғун изотоплари, кремнийнинг ${}_{14}Si^{28}$, ${}_{14}Si^{29}$, ${}_{14}Si^{30}$ турғун изотопларн учрайди ва ҳоказо умуман Z нинг ҳар бир қийматига, урандан кейинги элементлардан ташқари, ўртача учта турғун изотоп тўғри келади.

Изотопларнинг химиявий ва оптик хусусияти ҳар хил. Табиатда учрайдиган кўпгина химиявий элементлар бир неча изотопларнинг аралашмасидан иборат.

Шуни эслатиб ўтамизки, атомнинг физик-химиявий хусусиятлари нуқтаи назаридан унинг муҳим характеристикаси масса эмас, балки ядронинг зарядидир. Ҳақиқатан ҳам O^{16}, O^{17}, O^{18} изотоплар массаларининг турлича бўлишига қарамай бир элементнинг атомларидир, лекин ${}_7N^{15}$ ва ${}_8O^{15}$ ўзларининг масса сонлари бир хил бўлишига қарамасдан, улар турли химиявий элемеитларнинг атомларидир.

Масса сони бир хил бўлган, яъни нуклонлар сони бир хил бўлган, аммо заряди ҳар хил бўлган атом ядролари изобар ядролар деб аталади. Лекин A бир хил бўлганда ҳам изобар ядролар масса бўйича бирмунча фарқ қилади, масалан:

$${}_1H^3—{}_2He^3;\ {}_3Li^7—{}_4B^7$$ ва ҳоказо.

Масса сони $A=36$ дан бошлаб жуфт A га эга бўлган ядролар учун изобарлар одатда жуфт-жуфт бўлиб учрайди, масалан:

$${}_{18}Ar^{40}—{}_{20}Ca^{40}:\qquad {}_{20}Ca^{46}—{}_{22}Ti^{46}$$

ва ҳоказоси бўлиб 58 та изобарлар жуфти бор.

Бир неча изобар ядролар учлик (триада) изобарларни ҳосил қилади:

$${}_{40}Zr^{96}—{}_{42}Mo^{96}—{}_{44}Ru^{96};\qquad {}_{50}Sn^{124}—{}_{52}Te^{124}—{}_{54}Xe^{124};$$

$${}_{52}Te^{130}—{}_{54}Xe^{130}—{}_{56}Ba^{130};\qquad {}_{54}Xe^{136}—{}_{56}Ba^{136}—{}_{58}Ce^{136}.$$

Изотоп ва изобар ядроларни характерлашда кўпинча нейтрон зиёдлиги катталигидан фойдаланилади.

$$T = \frac{1}{2}(N - Z) - \frac{1}{2}(A - 2Z).$$

Шунингдек «кўзгу» ядролар тушунчасидан ҳам фойдаланилади: Z протонлар ва N нейтронлардан иборат ${}_{Z}X^{N+Z}$ атом ядроси бўлсин. Протонлар сони ядронинг нейтронлар сонига тенг ($Z_1 = N$), нейтронлар сони эса протонлар сонига тенг ($N_1 = Z$) бўлган иккинчи ядро ${}_{Z_1}Y^{N_1+Z_1}$ биринчи ядрога нисбатан кўзгу ядро деб аталади. Бошқача қилиб айтганда, биринчи ядронинг ҳамма протонларини нейтронлар билан, нейтронларини протонлар билан алмаштирилса, биринчи ядро билан биргаликда кўзгу ядролар жуфтини ташкил қилувчи 2-ядро ҳосил бўлади. Бундай кўзгу ядролар жуфтининг биринчиси нейтрон ${}_{0}n^{1}$ ва протон ${}_{1}H^{1}$ ҳисобланади.

Енгил ядролар соҳасида кўзгу ядро жуфтларига

$${}_{1}H^{3}(1p + 2n) - {}_{2}He^{3}(2p + 1n); \qquad {}_{4}Be^{7}(4p + 3n) - {}_{3}Li^{7}(3p + 4n)$$

ни мисол қилиб кўрсатиш мумкин. Бундай жуфтнинг битта ядроси кўпинча радиоактив бўлади. Кўзгу ядроларнинг хусусиятлари бир-бирига анча яқин бўлади.

Нейтронлар сони (N) бир хил, лекин протонлар сони (Z) ҳар хил бўлган атом ядролари изотонлар деб аталади. Изотон ядроларга: $N - 1$ бўлганда, ${}_{1}H^{2} - {}_{2}He^{3}$; $N - 2$ бўлганда, ${}_{2}He^{4} - {}_{4}Li^{5}$; $N = 3$ бўлганда эса, ${}_{3}Li^{6} - {}_{4}Be^{7}$ ва ҳоказони мисол қилиб кўрсатиш мумкин.

Атом ядросининг таркибини ифодалаш учун A, Z, N сонларнинг исталган бир жуфтидан фойдаланиш мумкин. Кўпинча масса сони A ва тартиб номери Z дан ёки нейтронлар сони N ва тартиб номери Z дан фойдаланилади.

A ва Z ёки N ва Z ларнинг қийматларидан фойдаланиб, маълум бўлган ҳамма ядроларни абцисса ўқи бўйича A ёки N, ордината ўқига Z қўйилган икки ўлчамли схемада (Сегре диаграммаси) жойлаштириш мумкин. Бу диаграммада маълум бўлган ҳамма ядролар анча тор йўлакда жойлашадилар. Бу йўлакчанинг бошида стабил ядролар учун муносабат $N/Z = 1$, ундан кейин бу муносабат орта боради.

Масалан, ${}_{20}Ca^{40}$ учун $\frac{N}{Z} = \frac{20}{20} = 1$, ${}_{40}Zr^{90}$ учун 1,25, ${}_{60}Nd^{142}$ учун 1,36 ва ${}_{80}Hg^{202}$ учун 1,52.

15-§. ЭНГ ЕНГИЛ ЯДРОЛАР

Табиатда одатдаги водороддан ташқари ядро техникасида портлатиш моддаси сифатида қўлланилувчи оғир водород дейтерий мавжуддир. Келажакда у термоядро энергетик қурилмалар учун ёқилғи сифатида хизмат қилади. Оғир водород 1932 йилда топилган эди. Унинг электрон қобиғи оддий водороднинг электрон қобигидан фарқ қилмайди, унда битта электрон мав-

жуд, аммо оғир водород ядроси оддий водород ядросидан тахминан икки марта оғирроқдир.

«Электрон ядро атрофида айланади» деб гапирганда ноаниқликка йўл қўйилади. Ҳақиқатда эса электрон ва ядро умумий оғирлик маркази атрофида айланади. Протон массаси электрон массасидан 1836 марта ортиқ бўлгани учун водород атомининг оғирлик маркази ядро марказига жуда яқиндир, лекин улар бир-бирининг устида ётмайди. Дейтерийда ядро массаси протон массасидан икки марта ортиқ бўлиб, ядро-электрон системасининг оғирлик маркази ядро марказига янада яқинроқда бўлади. Агар ядро массаси чексиз бўлса, оғирлик маркази ядро маркази устида ётган бўлар эди. Оддий ва оғир водород атомларидаги оғирлик марказлари ҳолатларининг бир оз бўлса-да, фарқи атомдаги электронлар энергияси сатҳларини ўзгартиради. Шунинг учун дейтерийнинг спектрал чизиқлари оддий водород чизиқларига нисбатан бир оз силжиган бўлади. Бу силжишни ҳисоблаш мумкин. Дейтерийнинг мавжудлиги протондан икки марта оғирроқ ядро учун ўлчанган силжишнинг ҳисоб натижалари билан бир хил бўлганидан кейин исбот қилинган эди. Спектрал тажрибалар учун оғир водород кўп миқдордаги суюқ водородни буғлатиш йўли билан олинади. Оддий водород осон қайнаб буғланади ва қолган қисми оғир водород билан бойитилади.

Дейтерий ядроси — дейтон ёки дейтрон бир-бири билан мустаҳкам боғланган икки зарра — протон ва нейтрал зарра нейтрондан иборат. Нейтрон 1932 йилда Англия олими Жеймс Чедвик томонидан топилган. Нейтроннинг массаси 1838,6 электрон массасига тенг бўлиб, протон массасидан бир оз оғирроқдир. Шунингдек, унинг ўз энергияси (масса билан ёруғлик тезлиги квадратининг кўпайтмаси) ҳам кўп. Ядродан ташқарида нейтрон барқарор бўлмайди. Унинг протон, электрон ва яна бир элементар зарра — нейтрино (аниқроғи антинейтрино)га ажралгунга қадар ўртача яшаш вақти 17 минутга тенг. Ўртача яшаш даври нейтронларнинг бошланғич сони 2,7 марта камайган вақтига тахминан тенг бўлади. Беқарор зарралар, шунингдек, ярим емирилиш даври билан, яъни модданинг ярми емирилиши учун зарур бўлган вақт билан ҳам характерланади. Совет олими П. Е. Спивак бажарган ўлчовларга кўра эркин нейтроннинг ярим емирилиш даври 11,7 минутга тенг, П. Е. Спивак ўтказган бу ишлари учун олтин медаль олди, шунингдек у Ю. А. Прокофьев билан 1962 йилда академик Курчатов номидаги мукофотни олди. Ярим емирилиш давридан ўртача яшаш даврига ўтиш учун ярим емирилиш даврини 0,693 бўлиш лозим. П. Е. Спивак олган маълумотларга кўра нейтроннинг ўртача даври 11,7/0,693, яъни 16,9 ёки яхлитлаб олганда 17 минутга тенг.

Табиатдаги барча водороднинг 0,999844 қисмини енгил водород ва 0,000156 қисмини ёки 0,0156% ини оғир водород ташкил қилади. Инсонлар термоядро энергиясидан тинчлик мақсадларида фойдаланишни ўрганганларида инсоният чексиз энер-

гетик манбага эга бўлади. Агар океанларда мавжуд бўлган барча дейтерий термоядро реакторларида ёқилса, ердаги барча казилма ёқилгилар (кўмир, нефть, газ, торф)ни ёқишдан ҳосил бўладиган иссиқликдан юз миллион марта ортиқ иссиқлик ажралади. Бунда биз дунёдаги барча қазилма ёқилгилар запасини шартли равишда 6000 млрд. *т* деб ҳисоблаймиз.

Юқорида айтганимиздек заряд бир хил, аммо массаси турлича бўлган ядролар изотоплар деб аталади. Оддий ва оғир водород — водороднинг барқарор изотопларидир. 1939 йилда Л. Альварец ва Р. Корног (АҚШ) оғир водородни нейтронлар билан бомбардимон қилиб водороднинг сунъий изотопи — тритийни ҳосил қилдилар. Тритий ядросида бир протон ва икки нейтрон бор.

Тритий барқарор эмас, унинг ярми 12 йилда емирилади. Бунда у электрон ва антинейтринони нурлаб гелийнинг енгил изотопи — «гелий-3» га айланади. Тритийни ядро реакторларида «литий-6» ни секин нейтронлар билан нурлантириш йўли билан олинади. «Литий-6» нейтронни қамраб гелий ва тритийга ажралади.

Тритийнинг радиоактивлиги кучли ва учувчан бўлганлиги учун инсон организмига таъсири жуда каттадир.

16-§ ЯДРО ТУЗИЛИШИ НАЗАРИЯСИ

Дейтон — мураккаб атомларнинг энг оддийсидир. Аммо бошқа барча ядролар ҳам, улар қанчалик катта бўлмасин, протонлар ва нейтронлардан иборат. Протонлар миқдори ядро зарядини, протонлар ва нейтронларнинг йиғиндиси эса унинг масса сонини кўрсатади. Гелий ядросида иккита протон бор. Табиатда икки типдаги гелий ядроси — гелийнинг икки изотопи мавжуд: Гелий-3 ядросида икки протондан ташқари бир нейтрон ҳам бор. Шундай қилиб, унда барча нуклонларнинг сони 3 га тенг. Гелий-4 ядроси икки протон ва икки нейтрондан иборат. Табиий гелий асосан гелий-4 дан иборат бўлиб, унда гелий-3 ўн мингдан бирга яқин процентни ташкил қилади. Углерод ядросида олтита протон ва олтита (C^{12}) ёки еттита (C^{13}) нейтрон бор. Табиий углероддa 1,1% ини углерод-13 ташкил этиб, қолган қисми углерод-12 дир. Кислород изотопининг энг кўп тарқалгани кислород-16 бўлиб саккизта протон ва саккизта нейтрондан иборат. Темир ядросида 26 та протон бор. Темирнинг тўрт стабил изотопи бор: 54, 56, 57, 58. Булардан энг кўп тарқалган темир-56 дир (91, 64 процент. Олтин фақат бир стабил изотопга эга, у олтин-197 дир. Бунда 79 та протон ва 118 та нейтрон бор. Табиатдаги элементлардан энг катта электр зарядга эга бўлган элемент уранднр. У 92 га тенг. Табиий уранинг учта изотопи бор: уран-234, бу изотоп табиатда жуда кам учрайди, уран-235 бу эса, табиатда 0,714 процентни ва уран-238, бу эса, 99,28 процентни ташкил этади. Табиатда ҳаммаси бўлиб 92 та элемент ва 300 га яқин изо-

топлар маълум, булардан бир қисми радиоактив элементлардир. Сунъий йўл билан яна 13 элемент топилган, улар 93-элемент нептунийдан бошлаб 105-элементгачадир. Ядро реакторларида ҳамда тезлаштирилган протонлар, дейтонлар, альфа-зарралар (гелий-4 ядролари) ва бошқа оғирроқ зарралар билан элементларни бомбардимон қилиш натижасида бир неча юзлаб сунъий изотоплар олинган. Сунъий изотопларнинг барчаси радиоактивдир. Табиий ва сунъий изотопларнинг умумий сони мингдан ортади. Ядронинг ҳажми тахминан ундаги нуклонлар — протонлар ва нейтронлар миқдорига пропорционал эканлигини эслаш фойдалидир. Ядронинг ҳажми тахминан нуклон ҳажми билан атом оғирлиги A нинг кўпайтмасига тенг. Бундан ядронинг радиуси нуклон радиуси (тахминан 1,3 ферми) билан атом оғирлигидан олинган учинчи даражали илдиз кўпайтмасига тенг бўлади.

Ядро нимадан иборат деган саволга илгари бундай жавоб берилар эди. Ядро протонлар ва электронлардан иборат бўлиб, протонлар унинг массасини белгиласа, электронлар эса электр зарядларининг бир қисмини компенсация қилади деб айтилар эди. Масалан, гелий ядроси тўртта протон ва буларнинг зарядларини компенсация қилувчи иккита электрондан иборат деб ҳисобланар эди. Аммо тажрибалар назарияни тасдиқламади. Аввало, ядронинг ўлчамлари шунчалик кичикки, электронлар унга сиғмайди.

Буниинг исботи учун электрон зарядини бир нуқтага тўпланган деб фараз қиламиз. Унга худди шундай нуқтавий зарядни яқин келтирамиз. Зарядни яқин келтиришда итариш электростатик кучларини енгиш учун иш бажаришга тўғри келади. Зарядлар бир-бирига қанчалик яқин келтирилса, шунчалик кўп иш бажарилади ва зарядларнинг потенциал энергияси шунча кўп бўлади. Потенциал энергия электроннинг ўз энергиясига тенг бўладиган масофа электроннинг классик радиуси деб аталади. Электроннинг ўз энергияси Эйнштейн формуласи ёрдамида аниқланади. Электроннинг радуси 2,8 фермига, протоннинг (шуниигдек, нейтроннинг) радуси эса 1,3 фермига тенг (1 ферми-10^{-13} *см*). Агар атомларнинг ядроси протонлар ва электронлардан иборат бўлганда уларнинг ўлчамлари тажрибада аниқланган ўлчамлардан анча ортиқ бўлур эди.

Протонлар ва электронлардан иборат атом ядроси схемасини тузишга уриниш электроннинг катталиги туфайли ядро ичига сиғмаганлиги учун ҳеч қандай ижобий натижа бермади. Аммо ядро ва электроннинг ўлчамлари электрон ва протонлардан тузилган ядро моделини инкор қилишга асосий сабаб бўлолмайди. Бу сабабга қарши ўлароқ электронлар ядро ичига тушгач пресланмайдиларми?— деган саволни қўйиш мумкин. Бу қарши қўйилган саволга яна бошқа сабаб келтириш мумкин ва ҳоказо. Ядронинг протон — электрон тузилишининг мумкин эмаслигини исботловчи яққол далиллар мавжуд.

Гарчи бу далил бошқа ядролар мисолида келтирилган бўлса ҳам уни дейтон мисолида кўрсатиш мумкин. Дейтон 1932 йилда топилган эди. Бу вақтда атом ядросининг ҳақиқий тузилиши равшан эди.

Ядрода уни ташкил қилувчи зарраларнинг сони жуфт ҳолда бир-бирига параллел ёки антипараллел йўналиши мумкин. Агар дейтонни икки протон ва бир электрондан иборат деб ҳисобласак, уч зарранинг спини бир томонга йўналганда ядронинг спини $\frac{3}{2}$ га тенг бўлиши мумкин. Агар икки зарранинг, спини антипараллел бўлиб бир-бирини компенсацияласа ва ядронинг спини компенсация қилинмаган учинчи зарранинг спинига тенг бўлса, у ҳолда ядронинг спини $\frac{1}{2}$ га тенг бўлиши керак. Тажрибада дейтоннинг спини 1 га тенглиги аниқланди. Бундан дейтонда спини $\frac{1}{2}$ бўлган зарралар сони тоқ бўлолмайди деган хулоса келиб чиқади. Бошқа ядроларда ҳам худди шундай қарама-қаршилик рўй берди. Ядронинг протон—электрон тузилиши квант механикаси асосларига зид бўлиб чиққани учун ундан воз кечишга тўғри келди.

Физиклар ядронинг мавжудлигини билар эдилар, аммо унинг қандай тузилганлигини, аниқроғи қандай зарралардан ташкил топганини билмас эдилар. Бу 1932 йилда нейтрон топилгандан сўнг ҳал бўлди. Нейтрон топилиши билан ўша йилнинг ўзидаёқ совет олими, ҳозирда Москва университетининг профессори Д. Д. Иваненко барча ядролар фақат икки хил заррадан — нейтронлар ва протонлардан иборат деб тахмин қилди. Бир оз вақт ўтгач, бу гипотезани немис физиги В. Гейзенберг батафсил ишлаб чиқди. Ҳозирги вақтда ядронинг нуклон тузилишига қарши бўлган бирорта ҳам факт йўқ.

Дейтон спинининг бирга тенг бўлиш сабаби ундаги протон ва нейтрон спинларининг параллел ориентациясидир.

17-§. ЯДРО КУЧЛАРИНИНГ ТАВСИФИ

Ҳозирги вақтда ядро кучларининг таъсир қонуни ва бу кучларнинг табиати тўла ҳал қилингани йўқ. Шунинг учун ҳам ядро кучларининг характери ҳақидаги тажрибалар муҳим аҳамиятга эгадир. Ядро кучлари намоён бўладиган процессларни қуйидаги уч группага ажратиш мумкин:

1. Икки эркин нуклонларнинг ўзаро таъсири, яъни нуклоннинг — нуклонда сочилиши.

2. Эркин нуклонларнинг мураккаб ядролар билан бўладиган ҳамда ядроларнинг ўзаро бўладиган таъсирлари.

3. Ядро таркибидаги нуклонларнинг ўзаро таъсирлари.

Ҳозирги замон тушунчаларига кўра ҳамма кўрсатиб ўтилган группалар учун содир бўладиган бирдан-бир ҳодиса—нуклонлараро мезон алмашинишидир. Тажриба маълумотларидан чиқади-

ган ядронинг асосий хусусиятларини қуйидагича таърифлаш мумкин:

1. Ядро кучлари нуклоннинг ўртача богланиш энергияси 7—8,5 *Мэв* бўлишини таъминлай оладиган жуда катта қийматлари билан характерланади. Буни таққослаш учун қуйидагини кўрсатиш мумкин. Электромагнит таъсир кучлари атом ва молекулаларнинг богланиш энергиясини бир неча электрон-вольт, ташқи ва ўрта — электронлар ва атом ядросиникини эса ўнларча, юзларча ва мингларча электрон-вольт бўлишини таъминлай олади, холос.

2. Ядро кучлари электромагнит ва гравитацион кучлардан фарқли ўлароқ, қисқа масофада таъсир этувчи кучлар бўлиб, нуклонлараро масофанинг ортиши билан кескин камайиб боради. Ядро кучларининг масофа ортиб бориши билан камайишини баъзан тақрибан $\frac{1}{r} e^{-r/r_0}$ ёки бошқа типдаги функциялар билан ифода этиш мумкин. r_0 масофадан каттароқ масофаларда ядро кучлари нолга тенг бўлиб қолади. Ядро кучларининг энг муҳим хоссаларидан бири тўйиниш хусусиятига эга бўлишидир, яъни ядродаги ҳар бир нуклон чекланган, яқин қўшни нуклонлар билангина ўзаро таъсирда бўлади, айни вақтда электромагнит ва гравитацион кучлар эса, узоқ таъсир этувчи хусусиятга эга бўлиб, қўшни бўлмаган зарралар орасида ҳам мавжуд бўлади. Ядро кучларининг тўйиниш хусусияти ядродаги боғланиш энергиясининг нуклонлар сонига пропорционал бўлишига олиб келади. Ядро моддасининг зичлиги ҳар хил ядролар учун тахминан бир хил бўлади, буни ядро ҳажмининг А га пропорционаллиги мисолида ҳам кўриш мумкин. Шундай қилиб ядрони «ядро моддаси»дан ёки ўта юқори даражада конденсирланган «нуклон суюқлиги»дан ташкил топган деб қараш мумкин. Бу эса атом ядросини «нуклон суюқлиги» томчисига ўхшатиш имконини беради.

Ядро кучларининг тўйиниш хусусияти жуда муҳим хулосага олиб келади, яъни нуклонлараро таъсир ҳамма жойда тортишиш кучидан иборат бўлмасдан, балки яқин масофаларда итариш кучига айланиб қолади. Бу эса нуклоннинг ўлчами чекланган эканлигидан далолат беради. Агар ядро таъсири фақат тортишиш кучи билан чегараланиб қолганда эди, зарралар бир-бирига ботиб кетишга интилган бўларди ва шу билан ядро — ҳажмининг А га пропорционаллик қонунини бузган бўларди.

4. Ядро кучларининг тўйиниш ва қисқа масофада таъсир этиш характерини тушунтириш учун ядро кучларини оддий молекулалардаги химиявий боғланиш кучлари каби «алмашинувчи кучлар» деб қабул қилинди. Бундан иккита ядро орасидаги ядро кучлари учинчи зарранинг алмашиниши натижасида вужудга келади деган хулоса келиб чиқади.

Ҳозирги замон тушунчаларига кўра бундай учинчи зарра $\pi(\pi^+, \pi^0, \pi^-)$ мезонлардан бири ёки бошқа оғир мезонлардан бири бўлиши мумкин.

5. Ядро кучларининг яна бир асосий хусусияти ҳар бир нуклоннинг спин ва орбитал ҳаракат моментларининг бир-бирига нисбатан йўналишига, боғлиқлиги, яъни спин — орбитал характерли бўлишлигида кўриш мумкин. Ядрода спин — орбитал таъсир муҳим роль ўйнайди ва у умумий таъсир энергиясининг тахминан 10% ини ташкил этади.

6. Ядро кучларининг яна бир махсус характери, яъни иккита нуклон орасидаги ядро таъсирининг қиймати фақат улар орасидаги масофагагина эмас, балки спинларнинг бир-бирига нисбатан йўналишига боғлиқлигида ҳам кўриш мумкин. Масалан, ядро кучлари n ва p орасидаги таъсир спинлари параллел бўлганда спинлари қарама-қарши бўлган ҳолдагига қараганда анча фарқ қилади. Бундай хулосанинг далили сифатида секин нейтронларнинг ортоводород (иккала протон спинларининг йўналиши бир хил, $S_n = 1$) ва параводород (спинларининг йўналиши қарама-қарши, $S_n = 0$) молекулаларида сочилиши тажрибасининг натижаларини олиш мумкин. Агар ядро кучлари $(n - p)$ нинг ўзаро таъсири спинларнинг ўзаро йўналишига боғлиқ бўлмаса, бу таъсир нейтронларнинг бошқа молекулаларда сочилиши билан бир хил бўлар эди. Экспериментал маълумотлар секин нейтронларнинг параводород молекулаларида сочилиш интенсивлиги ортоводород молекулаларида сочилиш интенсивлигига қараганда 30 марта катта эканлигини кўрсатади.

7. Ядро кучларининг қиймати ўзаро таъсирда бўлаётган нуклонларнинг зарядларига боғлиқ бўлмайди. Ядро кучларининг зарядга боғлиқ бўлмаслиги *изотопик инвариантлик* деб аталади. Бу эса иккита протон $(p - p)$ ёки иккита нейтрон $(n - n)$, ёки протон ва нейтрон $(p - n)$ орасидаги ядро кучлари қийматининг бир хил эканлигидан далолат беради. Бунда нуклонлар бир хил ҳолатда бўлиб, Паули принципига амал қилиши лозим.

18-§. ЯДРО КУЧЛАРИ ВА МЕЗОНЛАР

Ядро кучлари алмашинувчи кучлар бўлиб, бу кучлар нейтронларнинг протонларга, протонларнинг эса нейтронларга айланиши натижасида вужудга келишини юқорида айтиб ўтган эдик. Нейтрино ҳақидаги гипотезаларга асосланиб, ҳар бир мана шундай процессда икки зарра — электрон ва нейтрино алмашинувчи зарралардир, деб айтиш мумкин. Масалан, нейтрон ва протон ўртасидаги ўзаро таъсир натижасида нейтрон протонга айланади, айни вақтда электрон ва нейтрино чиқаради; кейинроқ электрон ва нейтринони протон ютади ва ўзи нейтронга айланади.

Ферминнинг бета — парчаланиш назариясига асосан ядрони бутун ҳолича сақлаб турадиган куч миқдорини ҳисоблаб чиқарнш мумкин.

Иккинчи томондан, бу кучларни протон ва нейтрон ўртасидаги тўқнашувни кузатиш асосида бевосита аниқлаш мумкин.

Иккала процесс натижалари бир-биридан кескин фарқ қилади. Ферминнг бета — парчаланиш назариясига кўра, ҳисоблаб чиқилган кучлар миқдори тўқнашувларни ўрганиш тажрибасида олинган натижалардан анча кам бўлиб чиқди. Шундай қилиб, тажриба билан назария ўртасида яна жиддий мунозара тугилди.

Буни бартараф этиш мақсадида япониялик физик Юкава 1935 йилда бир гипотезани майдонга ташлади. Бу гипотезага кўра, протонларнинг нейтронларга айланиши электрон ва нейтринонинг ютилиши йўли билан эмас, балки электрон массасидан бир неча юз марта ортиқ массали зарралар алмашуви йўли билан рўй беради. Бу зарранинг массаси протон ва электрон массаларн ўртасидагн оралиқ қийматдан иборат бўлгани сабабли бу зарра мезон деб атала бошланди. Электронга нисбатан олганда мезоннинг асосий хусусияти унинг барча нуклонларни бирга тутиб тура оладиган ўта «ёпиштирувчи» қобилиятга эга бўлишидир.

Юкава мезоннинг мавжудлиги тажриба билан назария ўртасидаги фарқни бартараф эта олишини кўрсатиб ўтди. Ядронинг бета-нурлар чиқаришини икки босқичли процесс деб қаралиши керак: биринчи босқичда — нейтрон протон ва манфий мезонга айланади; иккинчи босқичда — мезон ички куч таъсирида электрон ва нейтринога парчаланади. Ядронинг позитрон тарқатиши ҳам икки босқичда рўй беради: протон нейтрон ва мусбат мезонга айланади, кейинроқ, мусбат мезон эса, позитрон ва нейтринога парчаланади.

Олдинига Юкава гипотезаси унча эътибор қозона олмади, бироқ орадан бир неча йил ўтгач, Юкава айтиб ўтган хоссаларга эга бўлган зарра кашф этилди. Бир неча йил муқаддам америкалик олимлар томонидан космик нурларда позитроннинг топилиши сингари мезон ҳам шу тарзда кашф этилди. Улар Вильсон камерасида массаси электрон массасидан қарийб икки юз марта ортиқ бўлган ва заряди бирга тенг бўлган космик нурлар изини кузатишди. Мусбат ва манфий мезонлар ҳам мавжуд бўлиб, улар ички куч таъсирида парчаланиб, секуннинг миллиондан бир бўлаги мобайнида электрон ва нейтринога айланиши маълум бўлди.

Кейинроқ космик нурлар мезонлари ядро кучларн миқдорини аниқлашда назарда тутишга тўғри келадиган зарраларнинг айнан ўзидир деган фикр келиб чиқди. Бироқ тез орада бу фикр рад этилди.

Маълум бўлишича, космик нурлар мезонлари ядро билан камдан-кам ўзаро таъсирда бўлади: улар қалин жисм қатламидан ҳеч ютилмай ўтаверади.

Модомики шундай экан, ядроларни бириктиришда улар асосий роль ўйнашини кутиш мумкин эмас. Ядро кучларн ҳақидаги аввалги проблема ечилмай қолаверди. 1947 йили Пауэлл ва унинг Англиянинг Бристоль шаҳридаги ҳамкасблари янада оғирроқ мезонни кашф этишди. Бунда улар фотоэмульсия усу-

лидан фойдаландилар. Мазкур усул зарядланган зарралар эмульснядан ўтаётганда зарралар йўлидаги доначаларнинг «ёруғланишига» асосланган.

Эмульсия қайта ишлангач, бу йўл тўқ тусли доналар тарзида намоён бўлади ва уни микроскопда кўриш имкони туғилади. Изнинг узунлиги ва донанинг зичлигига кўра, зарранинг массаси ва энергиясини аниқлаш мумкин. Пауэлл фотопластинкаларга космик нурлар таъснр эттириб, унда қатор излар мавжудлигини аниқлади. Улар оралиқ массали ва бошқа оралиқ зарраларга тезгина бўлиниб кетадиган зарраларнинг учиб ўтишига боғлиқдир. Мазкур оралиқ зарралар авваллари космик нурланишларда кузатилган зарраларга ўхшашдир. Олим бу мезонларни бир-биридан фарқ қилиш мақсадида енгилроқ зарраларни мю-мезонлар деб ва янги кашф этилган оғирроқ зарраларни эса пи-мезонлар деб аташни таклиф этди.

Пауэлл кейинроқ анча сезгир эмульсия ёрдамида ажойиб фотосурат олдн. Унда мезонларнинг мунтазам ўзгаришн кўзга ташланиб туради. Биринчи из пи-мезонга тааллуқли бўлиб, унда зарралар зичлигининг пастдан юқорига томон орта бориши кўринади.

Кейии пи-мезоннинг умри ниҳоясига етади ва ўз изини қолдирадиган мю-мезон пайдо бўлади (9-расм), ниҳоят у электрон чиқариш билан тугайди.



9-расм. π+— мезоннинг, μ+— мезонга емирилиши.

Пи-мезонлар устида ўтказилган кейинги тадқиқотлар шуни кўрсатдики, улар ядро билан ғоят кучли таъсирда бўлади ва, шубҳасиз, Юкава айтиб ўтган зарра каби характерга эга. Пи-мезонларгина ядрода протон ва нейтронни бирга боғлаб туради; бундай зарралар *пион* деб аталади.

Мезонларнинг бошқа ҳеч қандай манбалари йўқлиги туфайли дастлабки тадқиқотлар космик нурланишлардаги мезонлар билан олиб борилди. Кейинчалик катта тезлатгич қурилмаларида сунъий йўл билан мезонлар олиш мумкинлиги аниқланди. Ўта юқори энергияли протонлар дастаси енгил элементга йўналтирилса, унда кўп миқдорда мезонлар тарқалишини кўриш мумкин. Кейинги йилларда қурилган улкан тезлатгичлар асосан ҳар хил мезонлар олиш учун мўлжалланган. Шундай қилиб, пи-мезон ва мю-мезонлар дастасини олиш имкони туғилди. Бу ҳол

улар хусусиятларини ўрганишни анча енгиллаштирди. Аниқланишича мусбат, манфий ва нейтрал пионлар мавжуд. Мусбат ва манфий пионларнинг массаси 273 электрон массасига, нейтрал пи-мезоннинг массаси эса 264 электрон массасига тенг. Пи-мезонларнинг яшаш даври қисқа: зарядланган пионнинг ўртача яшаш даври қарийб 10^{-8} секунд, нейтрал пионники эса қарийб 10^{-15} секунд.

Зарядланган пи-зарралар яшаш даври тугаши олдида мю-мезонларга ва нейтринога парчаланади. Нейтрал пи-мезон бўлса, ўз-ўзидан йўқолиб кетади, унинг массаси гамма-нурлар тарзида намоён бўлувчи энергияга айланади.

Мю-мезонлар ёки мюонларнинг мусбат ва манфий тури бўлиб, уларнинг ҳар иккисининг массаси бир хил, яъни 207 электрон массага тенг. Уларнинг ўртача яшаш даври $2{\cdot}10^{-6}$ секунд. Мусбат мю-мезон позитрон ва икки нейтринога, манфийси эса электрон ва икки нейтринога парчаланади. Бу икки нейтрино ҳаракат миқдори моментини сақлаш учун зарур бўлади. Пи-мезонлар ядро кучлари назарияси учун ғоят муҳим аҳамият касб этади. Бироқ мю-мезонларнинг аҳамияти ҳали аниқланмаган.

Мюонлар, электронлар ва позитронлардан фарқли ўлароқ, пионлар нуклонларга осонгина ютилади ва маълум шароитларда осонлик билан чиқарилади. Шу сабабли зарядланган зарралар электромагнит майдони билан ўралгандек бўлади, нуклонлар доим пи-мезон майдони билан қуршалган бўлади.

Пионлар ядроларнинг ўзаро таъсирини ҳам амалга оширa олади. Бунда улар электромагнит, гравитацион ва табиатдаги мавжуд бошқа кучлардан ҳам анча устунлик қилади.

«Ядро кучлари» иборасининг доим қўлланилавермаслигини айтиб ўтиш фойдалидир. Кўпинча бу ўринда «кучли таъсирлашув» ибораси ишлатилади. Яна уч хил таъсирлашув: кучсиз, электромагнит ва гравитацион таъсирлашувлар мавжуд. Химияда реакция тезлиги доимийси мавжуд бўлганидек, физикада ҳам, ҳар ҳолда химиядагига ўхшамаса-да, лекин алоҳида таъсирлашув доимийси мавжуд.

Пи-мезонлар майдони ҳосил қилган кучли таъсирлашув, тахминан 15 га тенг бўлган энг юқори доимийлик билан характерланади. Электромагнит майдон квантлари вужудга келтирган электромагнит таъсирлашувлар — таъсирлашувларнинг энг кучсиз туридир (доимийси 1/137). Электрон ва нейтрино майдонида ҳосил бўлган кучсиз таъсирлашувлар одатда бета-парчаланишда ёки мезонлар парчаланишида намоён бўлади. Кучсиз таъсирлашувларга жуда кичик боғланиш доимийси (масалан, 10^{-11}) мувофиқ келади. Ниҳоят, гравитацион таъсирлашувларнинг интенсивлиги кучсиз таъсирлашувларникига қараганда янада камроқ.

Ҳатто энг оғир элементар зарраларнинг боғланиш доимийси 10^{-48} дан ошмайди. Бу кучсиз таъсирлашувларга қараганда анча кучсиздир.

Нуклонларнинг ички структурасига «қўл солиш» учун физиклар тезлатилган электронлардан ва ўта «қаттиқ» гамма нурлардан фойдаланишга қарор қилдилар. Нейтронда ажойиб ва ғалати ҳоллар юз беради: унинг электр радиуси нолга тенг ёки ҳар ҳолда протонникидан анча кам. Бу нейтрон ё бутунлай нейтрал, ё унинг ичида электр заряди протонникига қараганда бир неча ўн марта кам масофада тўпланган деган гапдир. Умуман олганда, «элементар» зарралар — нуклонларни Сатурн планетасига ўхшатиш мумкин. Марказий қисм — ўзак — пионлар билан қуршалгани учун уни «мезон пўстини» ичида деб қаралади. Агар ўзак мусбат бўлиб, «пўстин» нейтрал пионлардан тузилган бўлса, бу ҳолда у протон бўлади; манфий пионлар билан қуршалган бўлса, у нейтрон бўлади. Протоннинг ўзаги нейтрал бўлиши ҳам мумкин, бунда «пўстин» мусбат пионлардан иборат бўлади. Шунга мувофиқ, нейтронли нейтрал ядро нейтрал пионлар билан қуршалади.

Маълумки, нуклонлар юқори энергияли зарралар билан парчаланганида янги мезонлар ҳосил бўлади. Лекин бунда нуклонлар устидаги «пўстин» олиниб, ўзак қисми «яланғочланиб» қолади деган маъно келиб чиқмайди. Нуклон ўзининг дастлабки қиёфасини йўқотмайди. Бу ерда гап пионларнинг ниҳоясизлигида эмас. Пионларнинг кўпайиш қобилияти уларнинг нуклонлар ичида мавжудлигини мутлақо англатмайди.

Бир нуклонли структура доим бошқа нуклонли структурага ўтиб туради: протон ва нейтрон эса, улардан ҳар бирининг турли хил ҳолатдаги аралашмаси ҳисобланади. Бироқ мезон «пўстини»га ўралган нуклон ўзакларининг қиёфаси протонлар ва нейтронларнинг электр радиусларининг кескин фарқланиши тўғрисидаги маълумотларга асло мувофиқ келмайди. Нейтрон ўзаги мусбат зарядланган бўлиши мумкинлиги юқорида айтиб ўтилган эди.

Совет олимларидан Д. И. Блохинцев, В. С. Барашенков ва Б. М. Барбашов нуклонларнинг электромагнитли тузилишига оид назарияни таклиф этдилар. Бу назария тажриба маълумотларига мутлақо тўғри келади. Унга кўра умуман, нуклон учун ва унинг ўзаги учун электростатик зичлик тақсимотининг мавжуд эканлиги тахмин қилинади. Протон заряди унинг ўзагига (ўзакнинг нейтрал бўлиши ҳам мумкин эканлиги ҳақида юқорида сўзлаган эдик) нисбатан анча мусбатдир. Нейтрон ўзаги ҳам ё нейтрал, ёки мусбат (манфий «пионлар пўстини»да) бўлади. Демак, нейтроннинг ичи ҳам турлича қисмларга бўлинган экан. Бундай қисмлардан бирида мусбат заряд, бошқасида эса уни мувозанатловчи манфий заряд бўлади.

Мана, нуклонларнинг нақадар мураккаб тузилганлиги энди аён бўлди. Энг оддий жисмлар ҳам шундай мураккаб кўринишга эга бўлади.

Нуклонларнинг нуклонларда сочилиши бўйича олиб борилган тажрибалар шуни кўрсатдики, нуклон ўзаги ёки бошқача айт-

ганда, кернинг радиуси қарийб 0,2 фермидан иборат. Икки нуклон кернлари бир-биридан кучли итарилади. Алмашиниб турувчи мезон кучлари таъсирига боғлиқ бўлмаган итарилиш кучларининг табиати ҳали аниқланмаган. У ҳозир лабораторияларда текширилияпти. Керида нуклоннинг қарийб 80 процент массаси тўпланган бўлиб, қолган масса эса ўта юмшоқ мезон «пўстини»ни ҳосил қилади.

19-§. СУНЪИЙ АТОМ

Физиклар Резерфорд ўтказган тажрибага асосланиб атом ядросини турли йўллар билан парчалаш устида иш олиб бордилар. Хилма-хил атомларнинг турли зарралар ёрдамида узлуксиз бомбардимон қилиниши ядронинг нақадар мураккаб тузилганлигини ва микродунё қандай қонун ва кучлар асосида бошқарилаётганлигини тасаввур қилишда, уни тушунишда фанга ёрдам кўрсатди. Агар физиклар атом ядросини парчалаш борасида шунчалик жонбозлик кўрсатмаганларида эди, ҳозирги кунда инсоният ядро энергиясига ҳам, кўпгина бошқа сунъий радиоактив изотопларга ҳам эга бўлмас эдилар. Кўпгина элементар зарраларнинг кашф этилиши ҳам шунга боғлиқ. Атом ядросини бомбардимон қилишни синчковлик, пухталик билан ўтказиладиган анализга таққослаш мумкин. Бироқ фанда анализ тугагач, ҳар доим синтезга ўтилади. Шунинг учун ҳам сунъий атомлар яратиш ҳақида фикр юритиш ўринлидир.

Позитроннинг кашф этилиши ҳақида гапирганда ажойиб бир нарса эътиборимизни жалб этган эди. Гап шундаки, электрон ва позитрон бир-бири билан учрашганда, кўпинча, икки ва камдан-кам ҳоллардагина уч ёки бир квантга аннигиляцияланади (аннигиляция — латинча йўқолиш, бартараф этиш демакдир). Бу ҳақда кейинроқ тўхталиб ўтамиз. Ҳозир эса биринчи сунъий атом — позитроний ҳақида гап юритамиз.

Позитрон ва электроннинг учрашуви вақтида позитроний (уларнинг аннигиляцияланувига қадар) ҳосил бўлади. Ўша қисқа вақт ичида (секуннинг қандайдир улуши давомида) зарра ва антизарра беқарор атом системасини вужудга келтиради. Улар олдинма-кейин массанинг умумий маркази атрофида айланади. Позитроний электрони протон атрофида айланадиган водород атомига ўхшайди.

Позитроннинг массаси электроннинкига тенг бўлганлигидан, бундай сунъий атом водород атомидан тахминан 1000 марта енгилдир. Шундай бўлса-да, позитроний диаметри водород атомининг диаметридан икки марта ортиқ бўлиб, унинг яшаш вақти баъзан секуннинг ўн миллиондан бир улушига, баъзан эса ўн миллиарддан бир улушига тенгдир. Бироқ вақтнинг шу даража қисқа бўлишига қарамай, позитрон ва электрон қарийб миллион марта айланиб улгуради. Сўнг позитрон ва электрон аннигиляцияланади — ёруғлик квантларига айланади.

Аннигиляцияда нима учун бир эмас, балки икки ёки ундан ортиқ миқдорда фотон вужудга келади? Бу ерда ҳам қатъий қонун — ҳаракат миқдорининг сақланиш қонуни ҳукм суради. Ўзаро таъсирда қанча жисм қатнашишидан қатъи назар уларнинг ҳаракат миқдорларининг йиғиндиси ўзгармай қолаверади. Ҳар қандай ҳаракатга мувофиқ келадиган қарши ҳаракат ҳосил бўлади. Мисол: милтиқдан ўқ отилиб чиққач, милтиқ қўндоғи елкага итарилади, демак, туртки ҳаракат вужудга келади. Бир фотоннинг отилиб чиқишидан сўнг (электрон ва позитроннинг аннигиляцияланиши натижасида) туртки ҳаракатнинг қайтарилиши муқаррар: бунда қарама-қарши томонга ҳам ўшанча миқдордаги энергияли фотон отилиб чиқади.

Баъзи ҳолларда позитроний ўзидан сўнг учта фотон қолдиради. Назарияда кўрсатилишича, янада кўпроқ миқдорда квантлар ҳосил бўлиши эҳтимол. Шуниси ҳам борки, аннигиляция жараёнида ажралиб чиққан энергия ана шу квантлар ўртасида тенг тақсимланади. Лекин кўпинча, позитроний иккита (парапозитроний) ва учта (ортопозитроний) фотон ҳосил қилиб, йўқолиб кетади. Парапозитронийнинг яшаш даври $1{,}25 \cdot 10^{-10}$ секунд, ортопозитронийники эса $1{,}4 \cdot 10^{-7}$ секунд.

Бунинг сабаби нимадалигини аниқлаш учун яна спинларга мурожаат қилиш керак. Позитроний мавжуд вақтда электрон ва позитрон спинлари бир-бирига ё мувофиқ тарзда, ё қарама-қарши йўналган бўлади. Демак, спинлар мажмуи 1 ёки 0 га тенг бўлади. Спинлар мажмуи 1 га тенг бўлса, ортопозитроний 0 га тенг бўлса, парапозитроний мавжуд бўлади. Позитрон ва электрон аннигиляцияланиш вақтида мунтазам равишда нозик ва мураккаб таъсирлашувлар бўлади. Бу таъсирлашувлар зарра спинларининг йўналишлари билан белгиланади.

Ҳаракат миқдори моменти сақланиш қонунига кўра спини бирга тенг бўлган ортопозитронийнинг икки фотонга бўлинишига йўл қўймайди. Ахир, икки фотоннинг спинлар мажмуи 2 ёки 0 га тенг-да! Энди фақат битта йўл қолди, у ҳам бўлса, ортопозитронийнинг учта фотонга бўлинишидир. Бир хил йўналишдаги икки фотоннинг спинлар мажмуи 2 га тенг бўлади. Учинчи фотон эса ортопозитроний спинининг бирга тенг эканлигини англатади. Ноль спинли парапозитронийнинг иккита қарама-қарши йўналишли фотонга парчаланиши эҳтимолдан холи эмас.

Позитроний — сунъий атомнинг бирдан-бир кўриниши эмас. Уни сохта атом (псевдоатом) деб аташ мумкин. Квант майдони мезон атоми ҳам ҳосил бўлиши мумкинлигини кўрсатади. Атом ядроси атрофида айланаётган электронларни манфий мезонлар билан хаёлан алмаштириб, ўшандай атом — мезон атоми ҳақида тасаввурга эга бўлишимиз мумкин. Юқорида айтиб ўтганимиздек, электроннинг ҳар бир энергетик ҳолатига маълум (дискрет) орбита тўғри келади. Агар атом ядроси ташқаридан фотон олса, ядронинг энергияси ортади ва электрон анча юқори энергетик сатҳга ўтади.

Электр кучлари электронни аввалги орбитасига қайтаради ва ютилган энергияни ядро яна фотон тарзида қайтариб чиқаради.

Ҳар бир элемент атоми қатъий энергетик орбитага эга. Шунинг учун ҳам ядродан нурланган фотонлар нурланишининг қатъий частотада бўлиши билан характерланади.

Агар водород атомидаги электрон манфий мезон билан алмаштирилса, у ҳолда мезон ҳам қатъий орбитага эга бўлади. Агар электрон мюон билан алмашса, бунда эҳтимол қилинган орбитанинг диаметри 206 марта кичик бўлади (буни мюоннинг электрондан 206 марта оғирлиги билан қиёслаш мумкин). Нурланадиган атом фотонларининг тўлқин узунликлари ҳам шу тарзда камая боради. Буни манфий пионларда юз берадиган барча ҳолларда кузатиш мумкин, бироқ бунда орбиталар диаметри ва тўлқин узунлиги 273 марта қисқаради.

Тўлқин узунликларининг шу тарзда қисқаришининг натижаси ўлароқ, кўринадиган ёруғлик ўрнига атом ўта олиш қобилияти паст бўлган рентген нурлари тарқата бошлайди. Ядро билан бўладиган таъсирлашувларнинг кучсизлиги туфайли мю-мезоатом кўпинча ютилгунга қадар парчаланиб кетади, пи-мезоатомда эса, аксинча атом парчалангунга қадар пи-мезон ядро томонидан ютилиб бўлади. Мезонлар ядро яқинида ҳаракатланиши туфайли мезоатомда ядронинг ўлчами ва шаклларини тадқиқ қилишда муҳим аҳамият касб этади. Яқинда Альварец ўз шогирдлари билан мю-мезомолекулалар пайдо бўлиши мумкинлигини ҳам аниқлади.

Биринчи мезоатомлар синхроциклатронда олинган эди (пи-мезоатомларни 1952 йилда Камак, мю-мезоатомларни эса Фит ва Рейнуотер кашф этган). Енгил элемент мезоатомларида мезонларнинг бир орбитадан иккинчи орбитага ўтганда нурланувчи квантлар тўлқин узунликлари шу мезоатомга мос келувчи оддий атомда электронларнинг ўтишида ҳосил бўлувчи нурланишлар тўлқин узунлигидан қисқа бўлади. Азот ва углерод каби нисбатан енгил элементлар устида олиб борилган тадқиқотларда мезоатом ва оддий атом тарқатган нур тўлқин узунлиги мюон ва электрон массаларининг 206 каррали фарқига мутлақо мос келган. Оғирроқ элементлар устида ўтказилган тажрибаларда рентген нурлари энергияси кескин камайиб кетди. Бунинг боиси нимада? Ядроси атрофида 82 та электрон айланадиган қўргошин атоми моделини кўриб чиқайлик. Агар шу электронлардан бири мезон билан алмаштирилса, унинг мумкин бўлган энг яқин орбитаси орбиталаридан энг яқинининг электронига нисбатан ядрога 82·206 марта яқин бўлади. Бошқача қилиб айтганда, мезон орбитасининг диаметри водород атоми диаметри (10^{-8} *см* га тенг) дан 82·206 марта кичик. Бу $5{,}9 \cdot 10^{-13}$ *см* деган гап. Қўрғошин атоми ядросининг диаметри эса $1{,}7 \cdot 10^{-13}$ *см* га тенг. Демак, мюон орбитаси атом ядросининг ичидан ўтади. Бу шубҳасиздир. Микродунёда ўзидан ўтказмаслик хусусияти мавжуд эмас. Шу туфайли, атом ядроси каби ўта зич жисмларда ҳам мюон бе-

малол ҳаракатлана олади. Мюон секундниng қандайдир юз миллиондан бир улуши давомидаёқ ядро ичида триллион марта айланиб чиқади, сўнгра уни ядро моддалари ютади.

Пион нуклон билан ўзаро шиддатли таъсирда бўлади. Шунинг учун ҳам пион ядрога яқин бўлган орбитага келиши билан протонга ютилади. Ютилган пион энергияси ядрони ғоят катта куч билан портлатади. Буни фотография эмульсиясининг қалин қатламида ҳосил бўладиган юлдузчалар мисолида кўриш мумкин. Элементар зарралар аслида элементар эмаслигини фотография яна бир бор исботлайди.

20-§. НУКЛОНЛАРНИНГ ШАКЛИ

Протон ва нейтронда магнит моментларининг катта бўлиши (протон учун бир ядро магнитони ўрнига +2,79, нейтрон учун эса ноль ўрнига — 1,913) уларда заряд ва массанинг бир хил тақсимланмаганидан дарак беради. Нуклонларнинг заряди уларнинг массасига нисбатан кўпроқ тарқоқдир. Нуклоннинг массаси асосан ядро марказида тўпланган. Нейтронда магнит моментининг бўлиши нейтроннинг ўрта ҳисобда нейтраллигини, ҳақиқатда эса мураккаб структурали зарядга эга эканини кўрсатади. Текширишлар нейтронлар тузилишининг дастлабки тасаввурини тасдиқлади. Бундай текширишлар айниқса Совет Иттифоқида ва АҚШ да жуда кўп ўтказилди. Нуклон радиуси 0,2 фермига тенг бўлган оғир ўзак ёки кернга ва деярли ғовак қобиққа эга. Зарядниng протон ва нейтроннинг ҳажми бўйлаб тақсимланишини аниқлаш соҳасида энг нозик ўлчашлар Стенфорд (АҚШ) университетида профессор Р. Хофстадтер раҳбарлигида ўтказилган. У бу ишлари учун 1961 йилда физика соҳаси бўйича Нобель мукофотини олган. Р. Хофстадтер протон ва нейтронларни (дейтон таркибида) жуда катта энергияга эга бўлган электронлар дастаси билан нишонга олган. Стенфорд университетидаги электронларни тезлатувчи тезлатгич электронларни 2 *Гэв* гача тезлаштира олади. Электрон дастасининг катта энергияга эга бўлиши туфайли Р. Хофстадтер нуклон ичига «чуқурроқ назар солиш»га муваффақ бўлди.

2 *Гэв* энергияга мос бўлган де Бройль тўлқин узунлигини унинг формуласидаги импульс ўрнига электроннинг ёруғлик тезлигига бўлинган энергия миқдорини қўйиб аниқлаш мумкин:

$$\lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{hc}{E} = \frac{10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 10^{9} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-12}} \approx 10^{-14}\ см = 0{,}1\ \text{ферми}.$$

Тўлқин узунлиги 0,1 фермига яқин экан, демак, унга мос келган энергиялик электронлар ёрдамида нуклон ичнин радиус бўйлаб текширганда ҳам тахминан ана шундай аниқликка эга бўламиз.

Олинган маълумотларга кўра, протон кернида 10—12 процентга яқин мусбат заряд бўлади. Нейтрон кернида ҳам миқдор жиҳатдан ана шунча заряд бўлиб, у манфийдир. Нейтрон кернидаги заряд ҳақида аниқ бир фикр йўқ. Баъзилар у ҳам протонга ўхшаш мусбат зарядланган деб ҳисоблайдилар. Биз

Р. Хофстадтер тажрибаларини деярли аниқ деб ҳисоблаб унинг натижаларини келтирдик. Аммо уларнинг узил-кесиллиги ҳақида тўлиқ ишонч йўқ. Нуклон тузилиши ҳақида ишончли назария бўлмагунча нуклоннинг ҳажми бўйича заряд ва масса тақсимотининг тўғрилиги ҳақида баъзи бир шубҳалар бўлади, албатта.

Протон зарядининг деярли 60 процентн радиуси 0,8 ферми бўлган сферада тўпланган. Протоннинг ташқи қатламларида 28 процентга яқин заряд мавжуддир.

Нейтроннинг ўрта қисмида (заряд жиҳатдан асосий қисм) манфий заряд тўпланган бўлиб, нейтроннинг ташқи қатламлари кучсиз мусбат зарядлангандир. Нейтронда мусбат зарядлар ўрта ҳисобда манфий зарядларни мувозанатлаштиради. Аммо заряд нейтрон ҳажми бўйича шундай тақсимланганки, унинг якуний магнит моменти гўё манфий заряд томонидан пайдо қилингандек кўринади.

Биз нуклонларни ядроларда боғлаб турувчи алмашинувчи кучлар ҳақида тўхтар эканмиз, нуклон энергияси ҳисобига жуда қисқа муддат яшовчи (10^{-23} *сек* га яқин) пи-мезонларнинг ҳосил бўлиши ҳақида эслатиб ўтган эдик. Нуклон ўзида узоқ муддатларда эга бўлиши мумкин бўлмаган энергияни қисқа муддатга бошқа нуклонлардан ўзлаштириб («қарз») олиши мумкин. Бундай процесс ноаниқлик принципига мос келади. «Қарз» олинадиган энергиянинг миқдори қанча катта бўлса, у шунча қисқа муддатга олинади. Нуклонлар бир-бирига жуда яқин турганда ўз энергияси ҳисобига ҳосил бўлган виртуал пи-мезонлар уларни бир-бири билан боғлайди (агар нуклон иккинчи қўшни бир нуклонга етиш чегарасида бўлса, яъни виртуал пи-мезон ихтиёрида бўлган вақт ичида нуклон қўшни нуклонга бориб ета олса). Агар қўшни нуклон бўлмаса-чи? Бу ҳолда нима бўлади? У ҳолда нуклон ўзи ҳосил қилган виртуал мезонларни ўзи ютади. Бу процесс узлуксиз давом этади. Нуклон пи-мезонлар булутн билан ўралган, улар пайдо бўлиб, ютилиб туради. Аниқроғи пи-мезон булутн билан керн биргаликда нуклонни ташкил қилади. Протонда пи-мезон булути мусбат зарядланган. Бироқ протонда мусбат пи-мезонлардан ташқари нейтрал пи-мезонлар булути ҳам бўлса керак. Икки протон тўқнашганда улар нейтрал пи-мезонлар билан алмашинадилар. Нейтроннинг мезон пўстинида ҳам мусбат, ҳам манфий пи-мезонлар мавжуд. Унда нейтрал пи-мезонлар ҳам бор. Нуклоннинг мезон пўстинини ҳосил қилувчи мусбат ва манфий пи-мезонлар электр зарядларни элтадилар ва айни вақтда ядро кучларини таъминлайдилар. Демак, «соф» пи-мезон булутида нуклоннинг электрик ва ядро ўлчамлари бир хил бўлиши керак. Аммо тажрибалар бу ўлчамларнинг бир-биридан бир оз фарқ қилишини кўрсатди. Назариячилар қобиқда пион булутидан ташқари пи-мезондан оғирроқ, ҳали маълум бўлмаган яна икки хил нейтрал мезонлар бор деб, бу қарама-қаршиликни ҳал қилдилар. Юқорида айтилганидек, улардан бири — массаси 1540 *э. м.* (электрон массаси) ва яшаш вақти

10^{-23} *сек* бўлган омега-мезон бўлиб, у 1961 йилда пуфакли камерада олинган 30 минг фоторасмларни қунт билан ўрганиш натижасида топилган эди. 90 та фоторасмларда икки нуклонни аннигиляцияланиш маҳсулотларининг изи топилган эди. Буни уч пи-мезонга, яъни уч нейтрал пи-мезонга ёки нейтрал мусбат ва манфий пи-мезонларга ажраладиган омега-мезон деб ҳисоблаш мумкин. Омега-мезонни пайқашнинг қийинлиги унинг нейтраллиги, жуда қисқа яшаши, пуфакли камерада из қолдирмаслигидир. Унинг мавжудлиги ҳақида ҳосилавий зарралар изи ёрдамидагина ҳукм чиқариш мумкин. 1961 йилнинг иккинчи ярмида худди шу усул билан, яъни ҳосила пи-мезонларнинг қолдирган изларини ҳисоблаш йўли билан иккинчи мезон, яъни ро-мезон ҳам топилди. Ро-мезон уч ҳолда нейтрал, мусбат ва манфий зарядланган ҳолда яшаши мумкин. Зарядланган ро-мезоннинг массаси нейтрал ро-мезон массасидан тахминан 40 *э. м.* қадар ортиқ. Биринчи ҳолда у 1500 э. м. га, иккинчи ҳолда эса 1460 *э. м.* га тенг. Ро-мезоннинг икки пионга ажралишигача яшаш вақти омега-ноль-мезон яшаш вақтидан тахминан уч марта ортиқ бўлса ҳам ядро вақти (10^{-23} *сек*) оралигидадир. Массаси 1070 *э. м.* га тенг бўлган янги умри қисқа зарра эта-ноль-мезон ҳам тахминан шунча яшайди. Шуни ҳам назарда тутиш лозимки, умри қисқа омега, ро- ва эта-мезонларни мезон деб аташ масаласи ҳалигача узил-кесил ҳал қилинган эмас. Эҳтимол, улар пи-мезонларнинг ассоциацияси натижаси бўлмиш қандайдир маҳсулотлардир. Кейинги вақтларда уларни кўпинча резонанслар ёки резонанс зарралари деб атайдилар. Шуни эслатиб ўтамизки, резонанс зарралардан фақат омега-ноль ва ро-ноль мезонларгина нуклон тузилишига эга.

Биз нуклоннинг деярли говак мезон қобиғини ташкил этувчи бир неча зарралар ҳақида массага аҳамият бермаган ҳолда гапирдик. Агар массани арифметик равишда ҳисобласак, унинг жуда катта эканлигини кўрамиз. Катта массалар фақат қисқа муддатдагина пайдо бўлади, умуман мезон булутининг массаси ўрта ҳисобда катта эмас, у нуклон массасининг унча катта бўлмаган бир қисмидир. Нуклонда омега ва ро-ноль-мезонлар ҳам виртуал зарралар сифатида яшайди. Массанинг қолган қисми керн ҳисобига тўғри келади.

Нуклоннинг мезон пўстинига етарли даражада тўхталиб ўтдик, энди кернига мурожаат қиламиз. Биринчи қарашда керн яхлит, абсолют қаттиқ, сиқилмайдиган шарча сифатида кўринади. Икки нуклоннинг керилари жуда катта куч билан бир-бирларидан итарилади. Бу куч ҳатто — 1—1,5 фермн масофадаги ядро кучларидан ҳам каттадир. Керн виртуал нуклон —антинуклон жуфтлари мавжуд бўлган соҳа бўлса керак деб гумон қиладилар. Бундай гумон қилишнинг сабаби шундаки, алмашиниш характерига эга бўлган ядро кучининг таъсир этиш радиуси юқорида кўрсатганимиздек тахминан унинг комптон тўлқин узунлигига тенг, яъни $m\,c$ га тескари пропорционал бўлади. Нук-

лон массаси пи-мезон массасидан 6,74 марта ортиқ бўлгани учун нуклоннинг комптон тўлқин узунлиги пи-мезон тўлқин узунлигидан ўшанча марта кичик бўлиб, у 0,2 фермига тенг бўлган нуклон кучи радиуси билан бир хил бўлади. Бу бир хилликдан ташқари юқорида қилган гумонни тасдиқловчи бошқа асослар ҳам мавжуддир. Энергияси нуклон-антинуклон жуфтининг туғилишига етарли ва бошқа бир пи-мезонга уриладиган пи-мезонни кўз олдимизга келтирайлик. Масалани соддалаштириш мақсадида бу пи-мезонни нейтрал деб фараз қиламиз (у зарядланган бўлиши ҳам мумкин). Бундай жуфт пайдо бўлмайди, деб айтишга асос деярли йўқ. Икки мезон тўқнашиб нуклон-антинуклон жуфтининг пайдо бўлиш моментида нуклон-антинуклон жуфтини пионлар орасидаги ўзаро таъсир майдонининг кванти деб ҳисоблаш мумкин. Бундай ўзаро таъсир натижасида истаганча яшовчи реал жуфт ҳосил бўлади. Агар энергия етарли бўлмаса, у ҳолда нуклон-антинуклон жуфти виртуал бўлади. Демак, фақат нуклонларгина виртуал пи-мезонларни ҳосил қилмасдан, пи-мезонлар ҳам виртуал нуклон-антинуклон жуфтларини ҳосил қилади. Бу процесс албатта жуфт бўлиши керак, акс ҳолда энергиянинг сақланиш қонунига риоя қилмаган бўламиз. Бизни ташкил этган ва бизга хизмат қиладиган модда таркибида «пайдо бўлмаган» жуфтлар сифатида антимоддалар ҳам бор деб айтиш мумкин. Бу жуфтларни виртуал ҳолатдаги реал жуфтларга айлантириш учун энергияни кўпайтириб, нуклон ёки пи-мезонни тезлатиб худди ана шундай зарра билан тўқнаштириш лозим. Бунда дарҳол антинуклон ва янги нуклон пайдо бўлади.

1963 йилдан бошлаб Кембридж (АҚШ)да электронларни 6 *Гэв* га тезлаштирувчи тезлатгич ишлай бошлади. Шундан кейин де Бройль тўлқин узунлигини уч марта камайтириш ва шу билан бирга ўлчаш аниқлигини ошириш имкони тугилди. 1963 йилнинг декабрида нуклоннинг марказга яқин структурасининг илгаригига нисбатан аниқроқ текширилиши ҳақидаги иш эълон қилинди (биринчи тажрибаларда тезлатгич энергияси 4 *Гэв* бўлган электронларни берган эди). Аниқ ўтказилган ўлчовлар нуклон тузилишида марказдан 0,2 ферма узоқликда деярли ўзгаришлар йўқлигини кўрсатди. Кери йўқ бўлиб чиқди. Нуклоннинг барча хоссалари унинг радиуси бўйича бир текис ўзгарар экан. Бу масаланинг муҳокамасида қатнашган физиклардан бири: «Фақат пўстинигина қолди. Аммо унинг мўлжалланган кишиси йўқ!», деб айтди. Нуклон қуюқсимон тузилишга эга. Аммо нуклоннинг юқорида баён этилган барча хоссалари ўз кучини сақлайди. Заряд ва масса ҳажмида бир хил тақсимланмаган. Яқин масофаларда табиати ҳам маълум бўлмаган жуда катта итарилиш кучлари мавжуд. Пи-мезонлар томонидан виртуал нуклон-антинуклон жуфтининг пайдо қилиниши ҳақидаги гоя ҳам ўз маъносини йўқотгани йўқ. Шуни назарда тутиш лозимки, жуфтлар фақат ядро марказидагина эмас, балки истаган жойда пайдо бўлиши мумкин.

III боб

РАДИОАКТИВЛИК

21-§. РАДИОАКТИВЛИК ҲОДИСАСИНИНГ КАШФ ЭТИЛИШИ ВА УМУМИЙ ХОССАЛАРИ

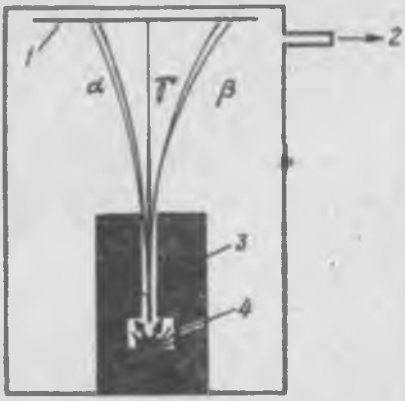
1896 йилда машҳур француз физиги А. Беккерель кейин эса Мария ва Пьер Кюриларнинг тадқиқотлари туфайли табиатда мавжуд бўлган уран, торий, радий ва полоний каби энг оғир элементлар ўз-ўзидан нур сочиш хусусиятига эга эканлиги маълум бўлди. Бу ҳодиса радиоактивлик ҳодисаси деган ном олди, бу фандаги ҳар қандай янгилик сингари, кўпчилик машҳур олимларни қизиқтириб қўйди.

Олимларнинг изланишлари натижасида 1912 йилгача 30 га яқин радиоактив элемент топилди ва уларнинг хоссалари ўрганилди, ўша пайтда Менделеевнинг элементлар даврий системасида фақат 12 та ўрин бўш эди. Шунинг учун янги 30 та элементни бу ўринларга жойлаштириш масаласи муаммо бўлиб қолди. Шу вақтда инглиз химиги Содди изотопларнинг мавжудлиги ҳақидаги фаразни илгари сурди ва шундан сўнг бу муаммони ҳал қилиш йўли топилди.

Радиоактив изотопларнинг элементлар билан айнанлаштирилиши уларнинг номларида ўз ифодасини топган. Бу номлар ҳозирга қадар кўпчилик дарсликлар ва китобларда қўлланилади. Масалан, полоний изотоплари Po^{212}, Po^{216} ва Po^{214} мос равишда радиоактив элемент торий C^1 (ThC^1), торий А (ThA) ва радий А (RaA) ҳамда уран изотопи U^{235} — актиноуран деб юритилган. Радиоактивликнинг асосий хусусияти — бир элементнинг мустақил равишда бошқа элементга айланишидир.

Юқорида айтиб ўтилганидек, 1896 йилда радиоактивлик ҳодисаси ёки, бошқача қилиб айтганда, уран ва баъзи бошқа оғир элементларнинг ички таъсир натижасида нурланиши кашф этилганидан сўнг орадан кўп вақт ўтмай, бу нурланишларни альфа-, бета- ва гамма-нурлар деб аталадиган бўлди. Бу нурларни магнит майдонида текшириш қулайдир. Ундаги мусбат зарралар бир томонга, манфий зарралар иккинчи томонга оғади, зарядсиз нурланишлар эса, мутлақо бурилмайди.

10-расмда радиоактив моддани кучли магнит майдонига жойлаштирилганда рўй берадиган манзара тасвирланган. Бунда бир группа нурлар чап томонга оғган. Бу мусбат электр зарядли зарралар оқимидир. Бундай зарралар оқими *альфа-зарралар* деб аталади. Альфа-зарралар бир хилда оғади, шунинг



10-расм. Радиоактив нурланиш турларини аниқлашга доир схема.

1 — фотопластинка, *2* — вакуум насосига йўл, *3* — қўрғошин ғўйача, *4* — радиоактив модда.

учун уларнинг энергияси бир хил бўлади, дейиш мумкин. Бошқа группа нурлар эса, ўнг томонга оғади. Бу манфий зарядланган зарралар бўлиб, уларнинг дасталари бир-биридан анча фарқ қилади, демак, мазкур зарралар турлича энергияда тарқалишар экан. Улар *бета-зарралар* деб аталади. Жуда синчиклаб текширишлар бу нурларнинг электронлар оқими эканлигини кўрсатди. Учиб чиқаётган электронларнинг тезликлари хилма-хил бўлиб чиқди. Юқоридаги мулоҳазалардан кўриниб турибдики, бета-зарралар энг тез электронлар экан.

Ниҳоят, магнит майдонидан мутлақо оғмай ўтадиган учинчи группа нурлар *гамма-нурлар* деб аталади. Магнит майдонида ўзаро таъсирнинг мавжуд бўлмаслиги гамма-нурлар ё электр зарядисиз зарралар оқими, ё соф тўлқин ҳодисаси — электромагнит нурланишидан иборатлигини англатади. Кейинчалик, гамма-нурларнинг ёруғлик тўлқинларига ўхшаб интерференция ва дифракция ҳосил қилишлиги бевосита кўрсатиб берилди. Бу гамма-нурларнинг табиати рентген нурларига ўхшаш бўлган электромагнит тўлқинларидан иборатлигини таъкидлайди. Ҳақиқатан ҳам, гамма-нурлар билан рентген нурлари ўртасида фарқ йўқ. Гамма-нурларнинг тўлқин узунлиги рентген нурларининг тўлқин узунлигига қараганда қисқароқ бўлади. Бу улар ўртасидаги асосий фарқ ҳисобланади. Ўшандай узунликдаги ва ҳатто радиоактив моддалардан тарқаладиган гамма-нурлардан ҳам қисқа бўлган рентген нурларини ҳосил қилишимиз мумкин. Лекин юқорида зикр этилган нурлар ўртасидаги фарқ уларнинг келиб чиқиш манбаларини англатади. Шунинг учун ҳам у номлар сақланади. Ядродан ташқарида вужудга келадиган нурларни рентген нурлари деб аталади. Ҳолбуки, гамма-нурлар ядродан чиқади.

Гамма-нурларни радиоактив парчаланишнинг иккинчи даражали маҳсули деб ҳисоблаш мумкин. Альфа- ёки бета-зарралар чиқиши натижасида радиоактив элемент ўзгаради. Кўпинча бундай ўзгаришдан вужудга келадиган изотоп уйғонган ҳолатда бўлади. Бу унинг энергияси нормал ҳолдаги ядро энергиясига нисбатан кўпроқ эканидан далолат беради. Мазкур ортиқча энергия гамма-нурлар деб аталувчи электромагнит нурланиш шаклида чиқиб кетади. Бу процесс уйғонган ҳолатдаги атомда содир бўладиган процессга ўхшашдир; унинг нормал ҳолга қай-

тиши ёруғлик чиқариши билан бирга юз беради. Ядродаги мавжуд энергия атомнинг сиртқи қобиғидаги энергиясидан қарийб миллион марта ортиқ бўлгани учун ҳам радиоактив моддалар тарқатадиган гамма-нурлар ўрта ҳисобда ёруғлик тўлқинлари энергиясидан деярли миллион марта зиёд энергияга эга бўлади.

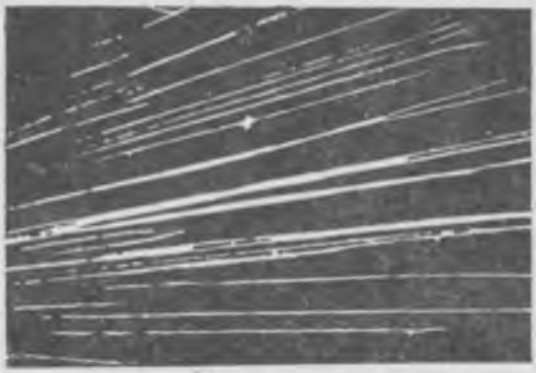
Ядронинг структурасини ўрганишдаги роли жиҳатидан альфа-зарралар муҳим аҳамият касб этади. Резерфорд альфа зарралар атом тузилишини ўрганишда энг қудратли омил эканини жуда эрта кўра билди. У ўзининг кўпгина ишларида айнан шу зарраларга асосланди. Резерфорд зарраларнинг электр ва магнит майдонларида четга бурилишини кузатиб, альфа-зарралар тезлигини ва зарранинг массага нисбати миқдорини ўлчашга муваффақ бўлди. Альфа-зарраларнинг умумий зарядини ўлчаш устидаги тажрибаларга асосланиб, айрим зарралар зарядларини ҳам ўлчаш имкони туғилди.

Ўтказилган тажрибалар барча радиоактив моддалар чиқарадиган альфа-зарраларнинг табиати бир хил эканини кўрсатди: улар мусбат зарядга эга бўлиб, иккита электрон зарядига тенг, массаси эса, водород атоми массасидан тўрт марта кўп. Ҳозирги тушунчаларга кўра, альфа-зарралар гелий атоми ядросидан иборат бўлиб, иккита протон ва иккита нейтрондан ташкил топган.

Бироқ ўша пайтларда ядролар ҳақида бирор нарса маълум эмас эди ва атомнинг, айтайлик, радийнинг нур тарқатиши борасида тахмин қилиш шунчалик гайри оддий эдики, бу фикрни айтишдан олдин бирор исбот бўлиши зарур эди. Резерфорд қуйидаги тадқиқот натижасида бундай исботни ярата олди. Маълум миқдордаги радон (радиоактив газ) найчага жойлаштирилди. Мазкур найчанинг деворлари радондан тарқалган альфа-зарраларни сиртқи найчага бемалол ўтказа оладиган даражада юпқадир. Тажриба бошлангунга қадар ташқи найча ичидаги ҳаво шундай сўриб олинган эдики, ҳатто спектроскопик анализда ҳам унда гелий қолдиги топилмади. Орадан бир неча кун ўтгач, ташқи найча ичида қандайдир газ тўплана бошлади. Босим орта борган сари бу газ разрядли найчага қамалди. Мазкур найчада у спектроскопик жиҳатдан анализ қилинди ва олинган спектр гелийнинг тўлиқ спектри экани аниқланди. Шундай қилиб, альфа-зарраларнинг гелий билан ўхшашлиги ҳам, радондан гелий олишнинг мумкинлиги ҳам бевосита исботланди.

Юқорида қайд этиб ўтилганидек, муайян радиоактив изотопдан чиқадиган барча альфа-зарралар бир хил энергияга эгадир. Бунга магнит майдонида альфа-зарралар дастасининг четга бурилишини кузатиш, шунингдек бевосита ўлчаш ёки Вильсон камерасида альфа-зарраларнинг изларини расмга (11-расм) олиш билан ишонч ҳосил қилиш мумкин. 11-расмдаги ҳар бир оқ чизиқ — альфа-зарралар изидир. Уларнинг деярли барчаси тўғри чизиқлардан иборат, бу эса, альфа-зарраларнинг умуман ўз йўналишини ўзгартмагани ҳолда ҳаво қатламидан ўта олиш хусу-

сиятига эга эканини кўрсатади. Альфа-зарралар ўтадиган оралиқ унинг эркин йўли узунлиги дейилади. Расмда бундай масофанинг узун йўли кўриниб турибди: атмосфера босими остида ҳавода битта группанинг эркин йўли узунлиги 4,8 *см*, бошқа группаники эса 8,6 *см* дан иборат. Бу ерда икки хил узунлик кўзга ташланади. Бунинг боиси мазкур тажрибада икки радиоактив манба торий-С ва торий-С′ қўлланилганидадир. Уларнинг ҳар



11-расм. α-зарралар «из»ларининг фотосурати.

бири ўзига хос эркин йўли узунлигига эга бўлган альфа-зарралар чиқаради. Умуман бу узунлик энергияга боғлиқ: зарралар энергияси қанчалик катта бўлса, у шунчалик узоққа бора олади. Эркин йўли узунлигини ўлчаш асосида зарралар энергиясини аниқлаш мумкин.

Ядро физикасида энергия *эрг* ҳисобида эмас, балки электрон-вольт *(эв)* ҳисобида ўлчанади. Протон ёки электрон электр майдонида тезлашса, улар майдон потенциалига мос энергияга эга бўлади. Электрон-вольтни электрон ёки протон бир вольт потенциал айирмасини ўтишида оладиган энергияси сифатида белгиланади. Икки зарядли альфа-зарра потенциаллар айирмасини ўтиш вақтида қўш энергияга эга бўлади. Торий-С ва торий-С′ группаларининг альфа-зарралари энергияси 6,1 ва 8,8 миллион электрон-вольт (*Мэв*) га тенг. Табиий радиоактив элементлар орасида торий-С′ нинг альфа-зарралари энергияси катта, торий-232 нинг альфа-зарралари энергияси эса энг кам бўлади.

Радиоактив моддаларнинг ички таъсир натижасида гелий ядроси ёки электронни ўзидан чиқаришини аниқлаб, бундай нурланишнинг натижаси қандай бўлади деб сўрашимиз мумкин. Резерфорд ва Содди бу борада биринчи тадқиқотчи эдилар, бироқ биз бу масалани ядронинг тузилиши ҳақидаги ҳозирги замон тасаввури нуқтаи назаридан таҳлил қиламиз. Гапни альфа-зарралар чиқариб парчаланадиган радийдан бошлаган маъқул.

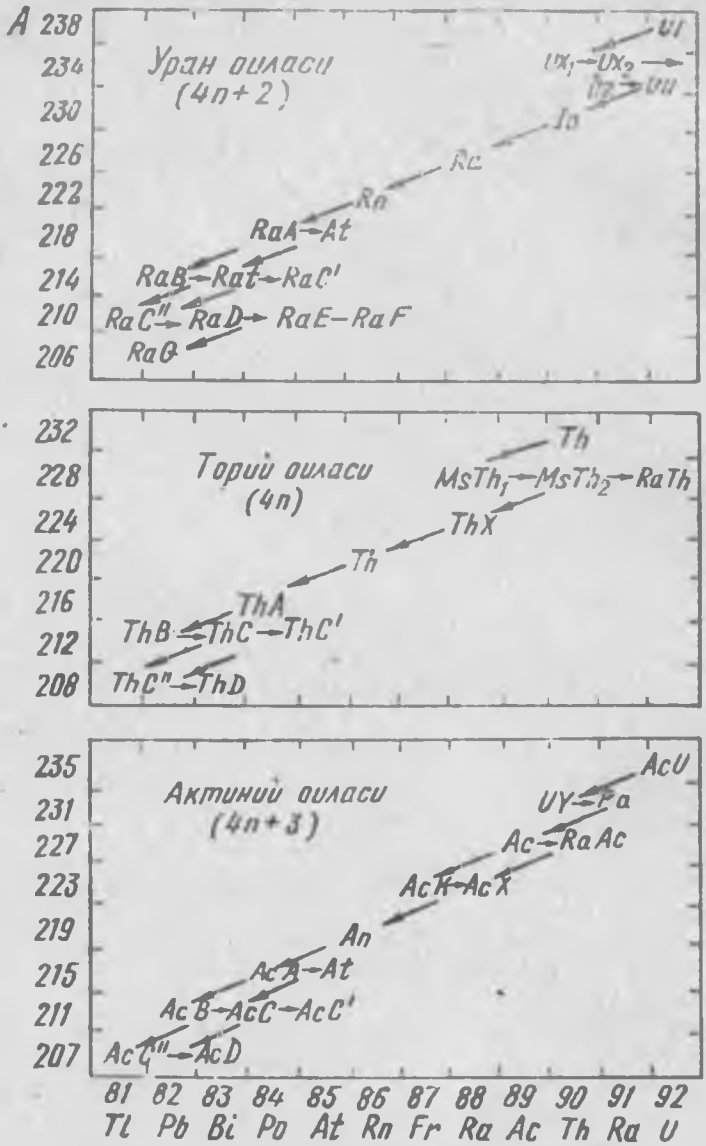
Бу элементнинг атом номери 88 ва масса сони 226 дан иборат бўлгани учун унинг ядроси 88 та протон ва 138 та нейтрондан тузилган. Агар ядродан альфа-зарра, яъни 2 та протон ва нейтрон чиқса, қолган элементнинг атом номери 86 ва масса сони 222 бўлади. Даврий жадвалда 86-номерли элемент инерт газлар (гелий, неон, аргон, криптон ва ксенон) группасига киради в у радон деб аталади. Шундай қилиб, альфа-зарраларнинг нурланиши туфайли радий радонга айланади. Бу жараён эса яна давом этади. Радон ҳам альфа-зарралар тарқатади. Бунинг натижасида атом номери 84 ва масса сони 218 бўлган полоний элементи ҳосил бўлади. Изотопларнинг мавжудлиги аниқланишига қадар бу модда радий-А деб аталар эди. У ўз навбатида альфа-зарралар чиқариб, атом номери 82 ҳамда масса сони 214 бўлган радий-В га айланади. Радий-В нинг ўзидан бета-нурлар чиқариш йўли билан парчаланиши аниқлаиди. Маълумки, нейтроннинг протонга айланиши туфайли элемент электрон чиқаради. Протон билан нейтроннинг массаси деярли тенг бўлгани учун ўзгариш туфайли олинадиган элемент ҳам айнан 214 массага эга бўлади, бироқ нейтронлардан бири протонга айлангани сабабли ядро заряди бирга ортади ва демак, элементнинг атом номери 83 бўлади, бу эса висмутдир. Шундай қилиб, радий-В нинг парчаланиш маҳсули радий-С ҳосил қилган висмут изотопидан иборат.

Барча радиоактив моддаларнинг бошқа моддаларга айланишини худди шундай усул билан кузатиш мумкин. Ҳар гал, альфа-зарра нурланганда элементнинг атом номери иккига, масса сони эса тўртга камаяди; ҳар бир бета-парчаланишда эса масса ўзгармайди, атом номери эса, бирга ошади. Масалан, X_Z^A элементнинг α-зарра чиқариш йўли билан Y элементга айланиши қуйидагича ёзилади: ${}_ZX^A \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_2He^4$. Барча радиоактив моддалар табиатда энг оғир элементлар орасида бўлади. Улар тўртта алоҳида радиоактив оилани ташкил этади.

Табиий радиоактив моддалар орасида γ-нурлар мустақил радиоактив нурланиш сифатида учрамасдан, кўпинча α- ёки β-нурлар билан бирга кузатилади.

Нурланиш натижасида радиоактив моддалар ўзининг химиявий табиатини ўзгартиради. α- ёки β-нурларни чиқариб, радиоактив элементнинг изотопларига айланади. Масалан, радий α-зарраларни нурлатиши натижасида, ўз хусусиятлари бўйича нодир элемент ҳисобланган радий инерт газ ҳисобланган радон атомларига (радий эманациясига) айланади. Шу сабабли биз радиоактив нурланиш натижасида бир химиявий элементни иккинчи химиявий элементга айланиши ҳақида гапиришимиз мумкин. Радиоактив айланиш натижасида ҳосил бўлган янги изотоп ҳам кўпинча радиоактив бўлади.

Менделеев жадвалининг охирида жойлашган ҳамма радиоактив элементларнинг изотоплари учун бошланғич моддалар (кў-



12-расм. Табиий радиоактив қаторларидаги атом номери билан атом оғирлигининг ўзгариши.

пинча уларни «она» элементлар деб атайдилар) уран, торий ва актиноуран (U^{235}) лар экан. Бошқа радиоактив изотоплар эса, уларнинг ҳосилалари («қизлари») экан. 12-расмда уран, торий ва актиноуранинг айланиш кетма-кетлиги келтирилган. Бу схемада радиоактив изотопнинг масса сони ва атом номери кўрса-

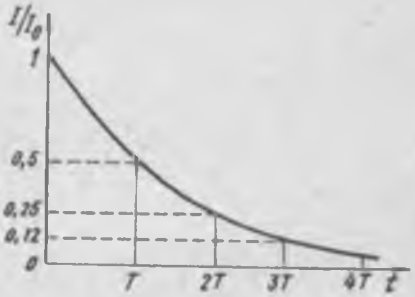
тилган. Расмдаги стрелкаларнинг узуни α ва қисқалари β радиоактив айланиш характерини билдиради. Бир она (бош) моддаиинг кетма-кет айланиши натижасида ҳосил бўлган изотопларнинг тўпламини радиоактив оила деб аташ қабул қилинган. 12-расмда келтирилган радиоактив оилаларнинг бош ва ҳосила элементларининг химиявий хусусиятларини текшириш натижасида Фаянс ва Содди радиоактив силжиш қоидаси деб аталувчи ажойиб қоидани топдилар:

1. Агар радиоактив айланиш процессида α-зарралар чиқарилса, Менделеев жадвалидаги берилган радиоактив элементдан икки катак олдинда жойлашган бошқа химиявий элементнинг изотопи ҳосил бўлади.

2. Агар радиоактив айланиш натижасида β-зарралар нурлатилса, кўрилаётган радиоактив элементдан кейинги катакдаги элементининг изотопи ҳосил бўлади.

Радиоактив айланиш процессида ядро заряди ўзгаради. Радиоактив айланишлар атом ядросида бўладиган процессдир.

Атом номери ва масса сонидан ташқари, ҳар бир радиоактив модда ўз атомининг парчаланиш тезлиги билан характерланади. Муайян радиоактив моддалардаги барча атомлар айни бир вақтда парчаланмайди; уларнинг баъзиларида бу процесс жуда қисқа муддат ичида, бошқаларида эса, жуда узоқ вақт давомида бўлади. Айнан шу процессда эҳтимоллик қонуни намоён бўлади; бироқ модда талайгина беқарор атомларга эга бўлар экан, бунда оддий статистик қонун амал қилади. Бу қонуннинг моҳияти — тенг вақт давомида умумий атомларнинг тенг улуши парчаланади. Одатда, барча атомларнинг ярми парчаланадиган вақт парчаланиш тезлигининг ўлчови бўлиб хизмат қилади. Уни ярим парчаланиш даври деб аталади ва муайян радиоактив изотопнинг характерли хусусияти ҳисобланади.



13-расм. Радиоактив емирилиш қонунининг график кўринишида тасвирланиши.

Радиоактив нурланиш интенсивлигининг ўзгариш графиги 13-расмда кўрсатилган. Бу графикда абсцисса ўқи бўйича вақт, ордината ўқи бўйича радиоактив нурланишнинг нисбий интенсивлиги I/I_0 қўйилган. 13-расмда келтирилган чизиқ радиоактив емирилиш чизиғидир.

Тажрибаларнинг кўрсатишича, моддаларнинг радиоактив емирилиши ҳамма вақт қуйидаги экспоненциал қонун бўйича бўлади:

$$I = I_0 e^{-\lambda t},$$

бунда I_0 — радиоактив модда бошланғич нурланишининг интенсивлиги, I — унинг t вақт моментидаги нурланиш интенсивлиги, λ — берилган радиоактив изотопга характерли бўлиб, радиоактив емирилиш доимийси ёки константаси деб аталади. Радиоактив процессларнинг ажойиб томони шундаки, λ радиоактив изотопнинг физик ва химиявий хоссаларига боғлиқ эмас.

Радиоактив нурланиш интенсивлиги радиоактив модданинг миқдорига пропорционалдир. Шунинг учун радиоактив емирилиш қонунини қуйидаги шаклда ёзиш мумкин:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \tag{17}$$

бунда N_0 — берилган радиоактив изотоп атомларининг бошланғич сони, N эса t вақт моментида сақланиб қолган атомлар сони.

(17) формуладан қуйидаги ифода келиб чиқади:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N, \tag{18}$$

$-\frac{dN}{dt}$ бир секунд вақт давомида емирилувчи ядролар сонидир. Демак, вақтнинг маълум бир моментида радиоактив модданинг ҳамма атомларидан фақат айримлари парчаланадилар, процесснинг ўзи эса, статистикдир. (18) ифодадан

$$\lambda = -\frac{1}{N}\frac{dN}{dt} \tag{19}$$

эканлиги келиб чиқади.

Демак, емирилиш доимийси (λ) бир секунд давомида емирилувчи радиоактив модда атомлари сонининг t вақт моментидаги радиоактив модда атомлари сонига нисбатидир.

Радиоактив емирилиш тезлигини характерлаш учун ярим емирилиш даври деб аталувчи катталикдан фойдаланилади. (Радиоактив модданинг тўлиқ емирилиш даврини аниқлаш маънога эга эмас, чунки (17) формулага биноан тўлиқ емирилиш $t=\infty$ вақтда бўлади.)

Ярим емирилиш даври $T_{1/2}$ шундай вақтки, бу вақт давомида радиоактив модданинг ярми емирилади. $T_{1/2}$ ва λ орасида қуйидаги муносабат мавжуд:

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}; \qquad T_{1/2} = \frac{0{,}695}{\lambda}. \tag{20}$$

λ катталик константа бўлганлиги учун, $T_{1/2}$ катталик ҳам константадир. Демак, радиоактив модданинг миқдори қанча бўлишидан қатъи назар, унинг ярми бир хил вақтда емирилади.

Емирилиш доимийси радиоактив емирилиш чизиғидан ҳисобланиб топилади. λ ни ҳисоблаш учун [(20) муносабатдан эса, $T_{1/2}$ ни ҳам] 13-расмдаги чизиқни ярим логарифмик масштабларда чизиш қулайроқ. Бундай координатларда радиоактив емирилиш чизиғи тўғри чизиқ орқали ифодаланади. Бу тўғри чизиқнинг X ўқи билан ҳосил қилган бурчагининг тангенси радиоактив емирилиш доимийсини ифодалайди.

13-расмда кўрсатилган радиоактив емирилиш чизиғини баъзан экспоненциал чизиқ деб ҳам юритилади.

Табиий радиоактив моддалар миллиард йиллардан секуннинг миллиондан бир улушича бўлган оралиқдаги ярим парчаланиш даврларига эга. Энг тез альфа-зарраларни тарқатадиган изотоп торий-С нинг емирилиш даври ғоят қисқа бўлиб, у $3 \cdot 10^{-10}$ секундга тенг, кичик энергияли альфа-зарраларни тарқатадиган торий-232 нинг ярим емирилиш даври анча катта ($1{,}4 \cdot 10^{10}$ йил).

Муайян модданинг активлик даражаси атомларнинг умумий сонига эмас, балки вақт бирлиги ичида емирилувчи моддаларнинг миқдорига боғлиқ бўлади. Ярим емирилиш даври қисқа бўлган оз миқдордаги модда емирилиш даври катта бўлган моддаларга нисбатан анча кучли радиоактивликка эга бўлиши мумкин, чунки биринчи тур моддалар ҳар секундда кўп нур тарқатади, иккинчиси эса, анча пассив емирилади. Секунд сайин парчаланувчи муайян моддалар атомларининг миқдори активлик деб аталади ва у кюри ҳисобида ўлчанади. Мазкур бирлик бир грамм радийнинг активлигига тенг бўлиб, секундига 37 миллиард атом емирилишини кўрсатади. Кюри анча йирик ўлчов бирлиги, шунинг учун ҳам кўпинча майдароқ бирликлар: милликюри (кюрининг мингдан бир қисми) ва микрокюри (кюрининг миллиондан бир қисми) қўлланади.

22-§. РАДИОАКТИВ ОИЛАЛАР

Юқорида ҳар бир радиоактив элементларнинг ярим емирилиш даври турлича эканлигини кўриб ўтдик. Масалан, уран-233 нинг ярим емирилиш даври $4{,}6 \cdot 10^9$ йил бўлса, полоний-212 niки секуннинг ўн миллиондан 3 улушига тенгдир.

Полоний шунчалик тез емирилишига қарамасдан унинг запаслари бошқа элементлар ҳисобига узлуксиз равишда тўлиб борганлиги учун у ҳозир ҳам табиатда учрайди.

Кўпгина радиоактив элементлар емирилгандан сўнг қолган ядролар ҳам ўз навбатида радиоактив элемент бўлади. Шунинг учун бир-бирига кетма-кет ўтувчи радиоактив элементлар қатори ёки оиласи пайдо бўлади (12- расм). Емирилиш процесси барқарор радиоактив ядро ҳосил бўлгунча давом этади.

Мисол учун 12- расмда келтирилган уран қаторини — оиласини кўриб чиқайлик. Уран-238 ўзидан альфа-зарра чиқариб, уран икс-1 элементига айланади. Ҳосил бўлган уран икс-1 элементининг атом оғирлиги ураннинг атом оғирлигидан 4 та кам бўлади. Бу элемент атом ядросининг заряди 90 га тенг. Унинг химиявий хоссалари торий элементиникига ўхшайди. Уран икс-1 ўз ядросидан бета-зарра чиқариб, уран икс-2 га айланади. Уран икс-2 химиявий хоссаси жиҳатидан протактинийга ўхшайди. Уран икс-2 ҳам ўзидан бета-зарра чиқариб, емирилади. Бунинг натижасида химиявий хоссалари ураннинг химиявий хоссаларига ўхшаш, аммо атом оғирлиги 234 га тенг бўлган уран икки ҳосил

бўлади. Уран икки альфа-зарра чиқариб парчаланганда, атом оғирлиги 230 га тенг бўлган торий элементи ҳосил бўлади.

Уран-238 нинг кетма-кет емирилиши натижасида қўрғошин ҳосил бўлади. Ҳосил бўлган қўрғошиннинг атом оғирлиги 206 га тенг. XX асрнинг эллигинчи йилларига қадар, учта радиоактив оила борлиги маълум эди. Бундан 10—12 йил илгари тўртинчи радиоактив оила мавжуд эканлиги аниқланди. Биринчи учта радиоактив оиланинг бош элементи уран, торий ва актинийдир. Оилага кирувчи ҳар бир элемент ўзидан олдингисининг альфа- ёки бета-емирилишидан ҳосил бўлади. Радиоактивлик натижасида ҳосил бўлган элементларни даврий системага жойлаштиришда инглиз олимлари Фаянс ва Соддн топган радиоактив силжиш қоидасидан фойдаланилади.

Уран оиласининг (бунга радий ҳам киради) бош элементи уран-238 изотопи бўлса, торий оиласининг бош элементи торий-232 дир. Бунинг ярим емирилиши даври 14 миллиард йил бўлиб, емирилиш охирида атом оғирлиги 208 бўлган қўрғошин изотопи (торий-Д) ҳосил бўлади.

Актиний оиласи ўз номини актиний элементидан олган. Лекин кейинчалик бу оиланинг бош элементи актиноуран деб аталувчи уран-235 изотопи эканлиги аниқланди. Уран-235 изотопининг ярим емирилиш даври 852 миллион йил бўлиб, табиий уранда 0,7 процент бўлади. Бу изотоп сўнгги вақтларда, айниқса, атом энергиясини олишда катта аҳамнятга эга бўлиб бормоқда. Актиноурандан уран-игрек ҳосил бўлади. У ўз навбатида қисқа давр — 24,6 соат ичида протактинийга айланади. Протактинийнинг ярим яшаш даври 3200 йил. У элементлар даврий системасининг 91-катагига жойлашган. Протактинийнинг атом оғирлиги 231 бўлиб, табиатдаги уран минераллари таркибида учрайди. Аммо уран минералларидан ажратиб олинган протактинийнинг миқдори ниҳоятда оз бўлиб, миллиграмм ҳисобида ўлчанади. Актиний протактинийнинг альфа-емирилиш маҳсулидир.

Актиний бета-емирилиш натижасида радиоактинийга айланади. Француз олимаси Маргарита Перейнинг кўрсатишича (1939 йил), актинийнинг бир қисми емирилиб, актиний-К элементига ҳам айланиши мумкин экан. Шундай қилиб, актинийнинг емирилиши альфа-бета «панжасини» ҳосил қилади:

$$_{89}Ac^{227} \begin{cases} \xrightarrow{\alpha} {}_{87}AcK^{223} \xrightarrow{\beta} {}_{88}Ac\,X^{223} \\ \xrightarrow{\beta} {}_{90}Rd\,Ac^{227} \xrightarrow{\alpha} {}_{88}Ac\,X^{223} \end{cases}$$

Актиний-К ҳозирча табиатда учрамаган 87-номерли элементдир. Унга франций (Fr) деб ном берилди. Актиний оиласининг сўнгги маҳсули атом оғирлиги 207 бўлган актиний қўрғошинидир.

Юқорида қайд қилиб ўтилган учта радиоактив оиладан ҳар бирининг масса сонини қуйидаги формулалар билан ифодалаш мумкин: $4n$—торий оиласи учун (торий-232—4×58); $4n+2$—уран оиласи учун (уран-235 — $4\times58+2$) ва $4n+3$ — актиний учун (актиний-231—$4\times57+3$) ёки (уран-235—$4\times58+3$).

Радиоактив оилада масса сонининг ўзгаришига альфа-зарранинг чиқиши сабаб бўлади. Шунинг учун бу оилалар ҳар бир аъзосининг масса сони ўша оиланинг формуласига мос келади. Оилалар орасида масса сони $4n+1$ формулага мос келадиган оиланинг бўлмаслиги ажабланарли ҳол эди. Аммо бу типдаги радиоактив оиланинг борлигини 1935 йилда Ирен Жолио Кюри, Гальбан ва Прейсверк исбот қилди. Бу оилага тегишли материаллар фақат 1947 йилдан кейингина кўпчиликка маълум бўлди.

Бу оиланинг бош элементи 1941—1942 йилларда кашф этилган уран-233 изотопидир (ярим яшаш даври 163 минг йил). Уран-233 изотопи ўзидан альфа-зарра чиқариши билан торий-229 изотопига айланади. Бу оила висмутнинг стабил изотопи висмут-209 билан тугайди. Аммо бу оилага кейинги пайтларда кашф қилинган франций-221 ва астатин-217 элементлари ҳам киради.

Уран-233 изотопи ҳам радиоактив емирилиш маҳсулидир. Ҳозирги вақтда масса сони $4n+1$ формулага мос келувчи бу янги оилани трансуран элемент плутонийнинг массаси 241 бўлган изотопидан бошланган дейиш мумкин. Емирилиш қуйидаги схема бўйича боради:

$$_{94}Pu^{241} \xrightarrow{\beta} {}_{95}Am^{241} \xrightarrow[500\ й.]{\alpha} {}_{93}Np^{237} \xrightarrow[2\ млн.\ й.]{\alpha} {}_{91}Pa^{233} \xrightarrow[24{,}2\ кун]{\beta} {}_{92}U^{233} \rightarrow \ldots$$

Плутоний-241 дан бошланиб қўрғошин изотопи, яъни қўрғошин-209 билан туговчи оилада энг узоқ яшовчи изотоп трансуран элемент — нептуний-237 бўлганлигидан бу оилани нептуний оиласи деб аталди.

Энди табиатда ярим емирилиш даври бир сутка, бир минут, ва ҳатто, секундининг бир улушидан иборат бўлган изотопларнинг мавжудлиги аён бўлиб қолди. Бу изотоплар бир вақтлар ўз асосчилари уран-238, уран-235 ва торий-232 дан ҳосил бўлган ўтмишдошларининг узоқ вақт давомида ўзгариш маҳсулоти бўлиб ҳисобланади. Бу уч изотопнинг ярим емирилиш даврлари ғоят узоқ.

Агар минерал, масалан, уран-238 га эга бўлса, унинг пайдо бўлганидан бери ўтган вақт давомида унда уран-238 емирилишининг охирги барқарор маҳсулоти, яъни қўрғошин-206 ҳосил бўлиши керак эди. Бу миқдор эса, минералнинг ёшига боғлиқ. Шу каби маълум миқдордаги қўргошин-207, уран-235 нинг емирилиши натижасида вужудга келади.

Қўрғошин-206 ва қўрғошин-207 нинг миқдорий нисбатини уран-238 ва уран-235 нинг миқдорий нисбатига таққослаб, минералнинг ёшини аниқ белгилаш мумкин.

Учта радиоактив оилага кирувчи 41 та изотопдан ташқари, бошқа элементларга хос бўлган бир қанча радиоактив изотоплар ҳам мавжуд. Булар калий, рубидий, лантан, самарий, люте-

цей ва рений изотоплари бўлиб, ўзининг ярим емирилиш даврининг анча узоқлиги билан характерланади. Табиий радиоактив элементлардан энг енгили калий-40 улар орасида энг ажойибидир. Калий-40 кишилар организмининг ягона радиоактив таркибий қисми ҳисобланади. Радиоактив калийнинг организмдаги умумий активлиги фақат 0,1 мккюрига етади

23-§. ЯДРОНИНГ БАРҚАРОРЛИГИ

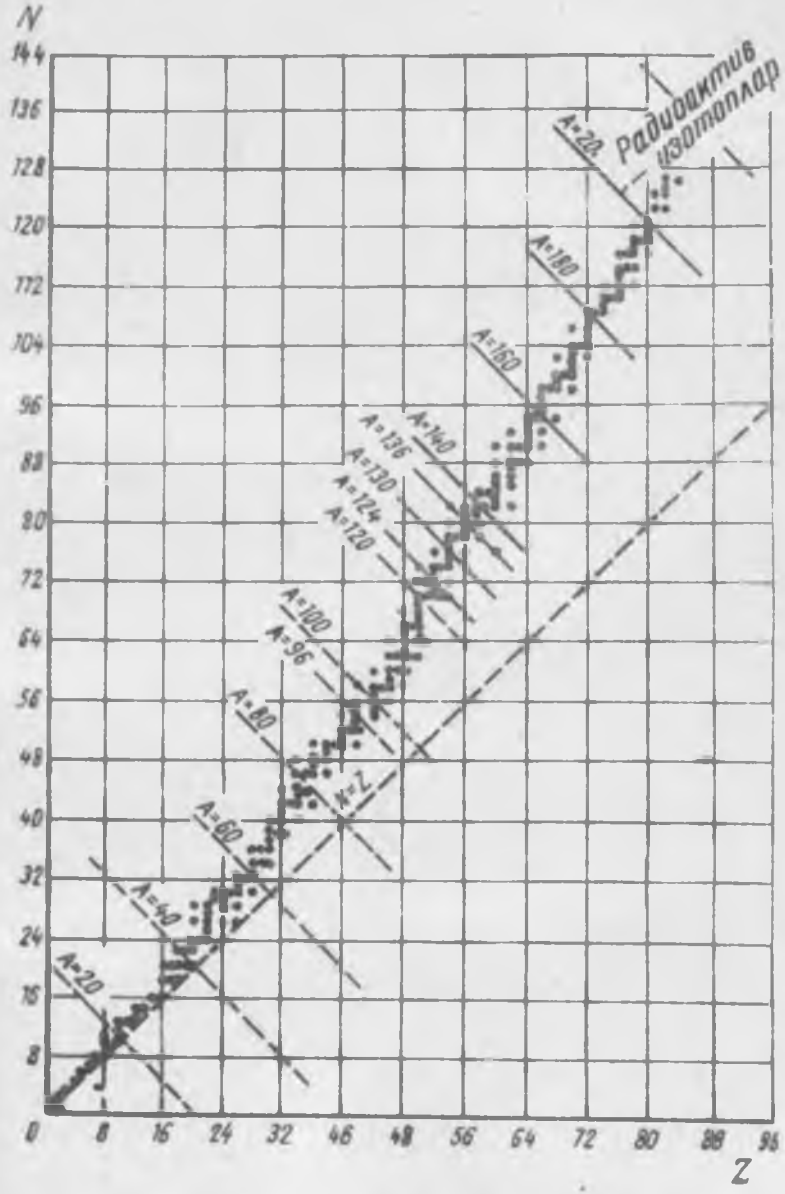
Нима учун баъзи элементлар барқарор ёмас? Нима учун баъзи моддалар альфа-зарралар, бошқалари эса, бета-зарралар тарқатади? Бу саволларга жавоб бериш учун барқарор ядролар ҳақида яна бирмунча тўхталиб ўтишга тўғри келади.

Табиатда мавжуд бўлган 81 та барқарор элементнинг атиги 275 та барқарор изотопи бор деб ҳисобланади. 14-расмда табиатда учрайдиган барча изотоплар тасвирланган. Горизонтал шкалада протонлар сони, вертикал шкалада эса нейтронлар сони келтирилган. Ҳар бир нуқта изотопдан иборат; бир вертикал чизиқда жойлашган нуқталар айни бир химиявий элементнинг изотопи ҳисобланади.

Енгил элементлардаги протонлар сони нейтронлар сонига тахминан тенг бўлиши, оғир элементларга яқинлашган сари ёса, нейтронлар сони протонлар сонига нисбатан тез ортиши кўриниб турибди. Ўта оғир элементларда нейтрон ва протон сонлари нисбати 1,6 га тенг. Бунинг сабабини аниқлаш осон. Нуклонлар орасида таъсир қилувчи ядронинг тортиш кучидан ташқари, протонларнинг электростатик итариш кучи ҳам мавжуд. Ядро кучлари жуда қисқа масофада таъсир этгани учун улар бир-бирига бевосита яқин бўлган нуклонлар орасида мавжуд бўлади. Шунга кўра, умумий тортиш кучи ядродаги зарралар миқдорига пропорционал бўлиши керак. Иккинчи томондан, протонларни итарувчи электростатик кучлар узоқ масофада таъсирда бўлади: бу ҳар қандай протон ядродаги исталган бошқа бир протонни итаради, деган гап. Шундай қилиб, умумий итарилиш кучи протонлар сони квадратига пропорционал бўлади. Ядродаги протонлар сонининг ошиши билан итарилиш кучи тортишиш кучига нисбатан орта боради, мувозанатни сақлаш учун талайгина зарралар (нейтронлар) тақозо этилади. Демак, нейтронлар протонларга нисбатан кўп бўлади.

Бундан чиқадики, протонлар ва нейтронлар миқдори орасидаги нисбат маълум қийматга тенг бўлгандагина ядролар барқарор бўла олади. Ҳақиқатан ҳам, 14-расмда барқарор изотопларнинг кўпгинаси графикнинг жуда тор қисмини эгаллаган.

Агар барқарорлик соҳасидан юқорида ёки пастда ётувчи ядро ҳосил бўлса, нималар рўй берар эди? Бундай ядро барқарормас бўлар ва у протоннинг нейтронга ёки, аксинча, нейтроннинг протонга айланишидан ҳосил бўлган ҳолатга ўтишга мойил бўларди.



14- расм. Нейтрон-протон диаграммаси.

Биз бундай процесс натижасида электрон ва нейтрино пайдо бўлишини биламиз. Электрон ядрода яшай олмагани учун ҳам у аста-секин чиқариб ташланади. Бунда бета-емирилиш ҳодисаси кузатилади.

Маълум изотопларнинг радиоактивлиги ва бета-емирилишга мақкумлиги энди тушунарли. Бироқ альфа-емирилиш ҳодисасини ҳам тушунтириш керак. Нима учун бета-емирилишга нисбатан барқарор бўлган баъзи изотоплар альфа-зарралар чиқариб парчаланади? Альфа-зарра элементар зарра бўлмай, балки тўрт нуклоннинг мажмуидан иборат бўлгани учун бу ҳодиса жуда ғалати туюлади. Буни тушунтириш учун ядронинг энергетик балансини кўриб чиқиш керак.

24-§. ЯДРОНИНГ БОҒЛАНИШ ЭНЕРГИЯСИ

Альфа- ёки бета-емирилиш йўли билан ядронинг ўзгаришида маълум энергия, яъни альфа- ёки бета-зарралар ҳаракати энергияси ҳамда гамма-нурларга хос бўлган бирмунча қолдиқ энергия ажралиб чиқади. Ядро парчаланишида ажралиб чиққан энергия гоят юқори — бир неча миллион электрон-вольт бўлиши мумкинлигини юқорида айтиб ўтган эдик. Бу энергия қаердан келади? Бу саволга жавоб бериш учун изотопларнинг атом оғирликлари миқдорини синчковлик билан кузатиш керак. Маълумки, барча изотопларнинг атом оғирликлари қарийб яхлит сонларга яқин. Ҳа, яқинликка яқин-у, аммо бутун сон эмас. Ҳамма гап шунда-да! Шу арзимаган фарқ ҳам муҳим аҳамият касб этади.

Келинг, альфа-зарраларни бир кўздан кечириб чиқайлик. У гелий ядросидан иборат бўлиб, икки протон ва икки нейтрондан тузилганлиги сабабли гелий ядроси оғирлиги икки протон ва икки нейтрон оғирликларининг мажмуига баробар бўлади, деб ўйлаш табиий. Амалда эса бундай эмас. Агар биз водороднинг икки атоми оғирлигини ва икки нейтрон оғирлигини қўшсак, 4,0342248 келиб чиқади, гелийнинг атом оғирлиги эса 4,003873 дан иборат. «Йўқолган атом оғирлик»нинг ҳоли нима кечди? Эйнштейннинг масса ва энергиянинг эквивалентлиги принципига мувофиқ у энергияга айланган.

Протон ва нейтронлардан ядро тузилганда маълум миқдорда энергия ва шунга мос равишда масса (ΔM) ажралиб чиқади. Одатда ΔM ни масса дефекти («етишмовчилиги») деб юритилади. У нейтрон ва протонлар массалари йиғиндисидан ядро массасининг айирмасига тенг:

$$\Delta M(Z,\ A) = Zm_p + (A - Z)m_n - M_я(Z,\ A).$$

бу ерда m_p — протон массаси, m_n — нейтрон массаси, $M_я(Z, A)$ эса ${}_ZX^A$ — изотопнинг массаси.

Масса дефекти барча маълум изотопларда мусбат қийматга эга. Ядролар протон ва нейтронлардан синтез қилинганда масса дефектига пропорционал равишда ядро боғланиш энергияси ҳосил бўлади. Агар масса дефекти маълум бўлса, ядронинг боғла-

ниш энергиясини, яъни ядрони ташкил этувчиларга ажратиб юбориш учун сарф қилинадиган энергияни ҳисоблаш осон:

$$E_{б\cdot эн.} = \Delta M \cdot c^2.$$

Баъзи химиявий реакцияларда энергия иссиқлик энергияси шаклида ажралади ва унинг миқдори муайян бирикманинг барқарорлик ўлчови бўлиб ҳисобланади; борди-ю, бирикма парчаланади дейлик, бунинг учун унинг ҳосил бўлишида қанча энергия кетган бўлса, шунча миқдорда энергия сарф қилишга тўғри келади. Шу каби, ядро таркибий қисмлардан ташкил топишида маълум энергия ажралиб чиқади ва бу энергия мазкур ядро барқарорлигининг ўлчови бўлиб хизмат қилади. Қиссадан ҳисса шуки, мураккаб ядро массаси уни ташкил этувчи таркибий қисмлари массаларининг йиғиндисидан кам; бошқача қилиб айтганда, айирма масса дефекти ядроларнинг боғланиш энергиясидан иборат.

Гелий ядроси учун боғланиш энергияси атом оғирлигининг 0,030 бирлигидан иборат бўлади. Бу миқдорни энергия бирликларида, масалан, электрон-вольт ҳисобида ифодалаш осон. Масса ва энергия ўртасидаги Эйнштейн муносабатидан шу нарса келиб чиқадики, атом оғирлиги бирлиги 931 миллион электрон вольтга эквивалентдир. Шундай қилиб, гелий ядросининг боғланиш энергияси 28 миллион электрон-вольтга тенг. Бу альфа-зарралар пайдо бўлаётганда ажралиб чиқадиган энергия миқдоридир. Боғланиш энергиясининг шунчалик катта бўлиши гелий ядросининг гоят барқарор структурага эга эканлигидан далолат берарди.

Боғланиш энергиясининг экспериментал натижалар билан жуда яқин келадиган ифодасини биринчи марта Вайцзекер аниқлаган эди. У беш ҳадли тенгламадан иборат:

$$E = a_{коб}A - a_{сирт}A^{2/3} - a_{кул}Z^2A^{-\frac{1}{3}} - a_{симм}\frac{\left(\frac{A}{2}-Z\right)^2}{A} + \delta. \quad (21)$$

Бу ифоданинг биринчи ҳади тўйиниш ядро кучларига боғлиқ бўлган ядронинг ҳажмий энергиясига тегишли. Бу ҳаднинг массага пропорционаллигини кўрдик. Иккинчи ҳади ядро сиртига пропорционал бўлган боғланиш энергиясининг камайишига тузатиш киритади ($4\pi R^2\delta = a_{сирт}A^{2/3}$). Сиртдаги нуклонлар унчалик тўйинган эмас. Шунинг учун уларнинг боғланиш энергиясига қўшадиган ҳиссаси унчалик катта эмас. Учинчи ҳади протонларнинг электростатик итарилиш энергиясини ҳисобга олади. Бу энергия заряд томчида бир текисда тақсимланганда заряд квадратига пропорционал бўлади:

$$E_{кул} = \frac{2}{5}\cdot\frac{Z^2e^2}{R} = a_{кул}Z^2A^{-1/3}.$$

Тўртинчи ҳад заряд энергиясига боғлиқ бўлиб, классик талқинга эга эмас. Жуфт-жуфт ядроларнинг барқарор изотоплари табиатда

Маълум изотопларнинг радиоактивлиги ва бета-емирилишга мақкумлиги энди тушунарли. Бироқ альфа-емирилиш ҳодисасини ҳам тушунтириш керак. Нима учун бета-емирилишга нисбатан барқарор бўлган баъзи изотоплар альфа-зарралар чиқариб парчаланади? Альфа-зарра элементар зарра бўлмай, балки тўрт нуклоннинг мажмуидан иборат бўлгани учун бу ҳодиса жуда ғалати туюлади. Буни тушунтириш учун ядронинг энергетик балансини кўриб чиқиш керак.

24-§. ЯДРОНИНГ БОҒЛАНИШ ЭНЕРГИЯСИ

Альфа- ёки бета-емирилиш йўли билан ядронинг ўзгаришида маълум энергия, яъни альфа- ёки бета-зарралар ҳаракати энергияси ҳамда гамма-нурларга хос бўлган бирмунча қолдиқ энергия ажралиб чиқади. Ядро парчаланишида ажралиб чиққан энергия гоят юқори — бир неча миллион электрон-вольт бўлиши мумкинлигини юқорида айтиб ўтган эдик. Бу энергия қаердан келади? Бу саволга жавоб бериш учун изотопларнинг атом оғирликлари миқдорини синчковлик билан кузатиш керак. Маълумки, барча изотопларнинг атом оғирликлари қарийб яхлит сонларга яқин. Ҳа, яқинликка яқин-у, аммо бутун сон эмас. Ҳамма гап шунда-да! Шу арзимаган фарқ ҳам муҳим аҳамият касб этади.

Келинг, альфа-зарраларни бир кўздан кечириб чиқайлик. У гелий ядросидан иборат бўлиб, икки протон ва икки нейтрондан тузилганлиги сабабли гелий ядроси оғирлиги икки протон ва икки нейтрон оғирликларининг мажмуига баробар бўлади, деб ўйлаш табиий. Амалда эса бундай эмас. Агар биз водороднинг икки атоми оғирлигини ва икки нейтрон оғирлигини қўшсак, 4,0342248 келиб чиқади, гелийнинг атом оғирлиги эса 4,003873 дан иборат. «Йўқолган атом оғирлик»нинг ҳоли нима кечди? Эйнштейннинг масса ва энергиянинг эквивалентлиги принципига мувофиқ у энергияга айланган.

Протон ва нейтронлардан ядро тузилганда маълум миқдорда энергия ва шунга мос равишда масса (ΔM) ажралиб чиқади. Одатда ΔM ни масса дефекти («етишмовчилиги») деб юритилади. У нейтрон ва протонлар массалари йиғиндисидан ядро массасининг айирмасига тенг:

$$\Delta M(Z,\ A) = Zm_p + (A - Z)m_n - M_я(Z,\ A).$$

бу ерда m_p — протон массаси, m_n — нейтрон массаси, $M_я(Z, A)$ эса ${}_ZX^A$ — изотопнинг массаси.

Масса дефекти барча маълум изотопларда мусбат қийматга эга. Ядролар протон ва нейтронлардан синтез қилинганда масса дефектига пропорционал равишда ядро боғланиш энергияси ҳосил бўлади. Агар масса дефекти маълум бўлса, ядронинг боғла-

ниш энергиясини, яъни ядрони ташкил этувчиларга ажратиб юбориш учун сарф қилинадиган энергияни ҳисоблаш осон:

$$E_{б.ан.} = \Delta M \cdot c^2.$$

Баъзи химиявий реакцияларда энергия иссиқлик энергияси шаклида ажралади ва унинг миқдори муайян бирикманинг барқарорлик ўлчови бўлиб ҳисобланади; борди-ю, бирикма парчаланади дейлик, бунинг учун унинг ҳосил бўлишида қанча энергия кетган бўлса, шунча миқдорда энергия сарф қилишга тўғри келади. Шу каби, ядро таркибий қисмлардан ташкил топишида маълум энергия ажралиб чиқади ва бу энергия мазкур ядро барқарорлигининг ўлчови бўлиб хизмат қилади. Қиссадан ҳисса шуки, мураккаб ядро массаси уни ташкил этувчи таркибий қисмлари массаларининг йиғиндисидан кам; бошқача қилиб айтганда, айирма масса дефекти ядроларнинг боғланиш энергиясидан иборат.

Гелий ядроси учун боғланиш энергияси атом огирлигининг 0,030 бирлигидан иборат бўлади. Бу миқдорни энергия бирликларида, масалан, электрон-вольт ҳисобида ифодалаш осон. Масса ва энергия ўртасидаги Эйнштейн муносабатидан шу нарса келиб чиқадики, атом огирлиги бирлиги 931 миллион электрон вольтга эквивалентдир. Шундай қилиб, гелий ядросининг боғланиш энергияси 28 миллион электрон-вольтга тенг. Бу альфа-зарралар пайдо бўлаётганда ажралиб чиқадиган энергия миқдоридир. Боғланиш энергиясининг шунчалик катта бўлиши гелий ядросининг гоят барқарор структурага эга эканлигидан далолат берарди.

Боғланиш энергиясининг экспериментал натижалар билан жуда яқин келадиган ифодасини биринчи марта Вайцзекер аниқлаган эди. У беш ҳадли тенгламадан иборат:

$$E = a_{\text{қоб}} A - a_{\text{сирт}} A^{2/3} - a_{\text{кул}} Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_{\text{симм}} \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \delta. \quad (21)$$

Бу ифоданинг биринчи ҳади тўйиниш ядро кучларига боғлиқ бўлган ядронинг ҳажмий энергиясига тегишли. Бу ҳаднинг массага пропорционаллигини кўрдик. Иккинчи ҳади ядро сиртига пропорционал бўлган боғланиш энергиясининг камайишига тузатиш киритади ($4\pi R^2\delta = a_{\text{сирт}} A^{2/3}$). Сиртдаги нуклонлар унчалик тўйинган эмас. Шунинг учун уларнинг боғланиш энергиясига қўшадиган ҳиссаси унчалик катта эмас. Учинчи ҳади протонларнинг электростатик итарилиш энергиясини ҳисобга олади. Бу энергия заряд томчида бир текисда тақсимланганда заряд квадратига пропорционал бўлади:

$$E_{\text{кул}} = \frac{2}{5} \cdot \frac{Z^2 e^2}{R} = a_{\text{кул}} Z^2 A^{-1/3}.$$

Тўртинчи ҳад заряд энергиясига боғлиқ бўлиб, классик талқинга эга эмас. Жуфт-жуфт ядроларнинг барқарор изотоплари табиатда

жуда кам учрайдиган тоқ-тоқ ядроларга нисбатан турғунлигини ҳисобга олиб, нуклонларнинг жуфтланиш эффектини ҳисобга олувчи ҳад — δ киритилган. Тажрибалар кўрсатишича, у $A^{-3/4}$ га пропорционалдир ($\delta = a_{жуфт} A^{-3/4}$).

Яқинда америкалик физик Грин тажриба натижаларини пухта ўрганиб, боғланиш энергияси учун қониқарли натижаларни берувчи коэффициентлар қийматларини аниқлади:

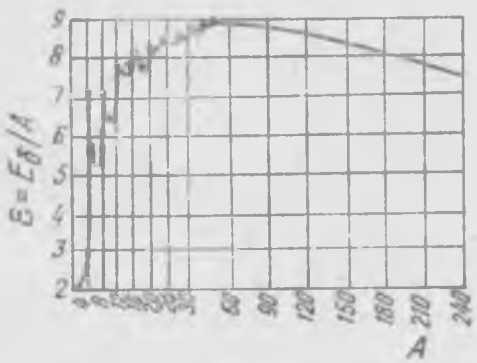
$a_{хаж} = 15{,}75$ *Мэв*;
$a_{сирт} = 17{,}8$ *Мэв*;
$a_{кул} = 0{,}71$ *Мэв*;
$a_{симм} = 94{,}8$ *Мэв*;
$a_{жуфт} = 34$ *Мэв*;

$$\delta = \begin{cases} +(\delta) — жуфт\text{-}жуфт\ ядролар\ учун \\ 0 — тоқ\ ядролар\ учун \\ -(\delta) — тоқ\text{-}тоқ\ ядролар\ учун \end{cases}$$

Енгил ядроларда битта нуклонга тўғри келадиган энергиянинг ўсиши ва масса сони катта бўлган ядролар учун E/A нинг ўсиши Вайцзекер ифодасидан равшан кўриниб турибди. Дарҳақиқат, коэффициентларнинг юқорида келтирилган қийматларидан фойдаланиб ва ифодадаги охирги ҳадни ҳисобга олмасак, битта нуклонга тўғри келадиган энергияни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$-E_б/A = -15{,}75 + 17{,}8 \cdot A^{-1/3} + 0{,}71 \cdot Z^2 \cdot A^{-4/3} + 94{,}8\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 \cdot A^{-2}. \qquad (21а)$$

Енгил ядролар учун бу ифоданинг охирги ҳади нолга тенг, ундан олдингси ҳади эса жуда кичик. Шунинг учун эгри чизиқнинг енгил ядролар учун кескин ортиши $17{,}8 \cdot A^{-1/3}$ ҳадга боғлиқ. Бу ҳад ядро суюқлигининг сирт таранглигини ҳисобга олади. Оғир ядролар учун бу эгри чизиқнинг (15-расм) секин ўзгариш сабаби Z^2га пропорционал бўлган учинчи ҳаднинг ортишига боғлиқ, яъни даврий система охиридаги ядроларнинг битта нуклонга тўғри келадиган боғланиш энергиясининг камайиши протонлар орасидаги итариш кучларининг ортишига боғлиқ.



15-расм. Нуклоннинг боғланиш энергияси.

Бошқа барча изотопларнинг боғланиш энергиясини ҳам худди юқорида кўрсатилган усулда аниқлаш мумкин (3-жадвал). 15-расмда тасвирланган график ядродан битта заррани ажратиб олиш учун зарур бўлган энергиянинг ўртача миқдорини билдиради. Енгил элемент ядроларида боғланиш энергияси миқдори расмда узлуксиз чизиқлар билан кўрсатилганидек равон ўзгармайди. Дарҳақиқат, гелий-4, углерод-12, кислород-16 каби баъзи

Ядронинг ва ядродаги ҳар бир нуклонга тўғри келадиган боғланиш энергияси

Изотоп	Масса М, (у.м.а.б.)	Масса ортиқлиги, М—А (у.м.а.б.)·10⁻³	Боғланиш энергияси, Е, *Мэв*	Ҳар бир нуклонга тўғри келадиган боғланиш энергияси, Е/*А*
$_0n^1$	1,00866544 (±43)*	8665,44±0,43		
$_1H^1$	1,00782522 (±08)	7825,22±0,08		
$_1H^2$	2,01410219 (±11)	14102,19±0,11	2,22471(±40)	1,1123
$_1H^3$	3,01604940 (±23)	16049,40±0,23	8,4824 (±8)	2,8274
$_2He^3$	3,01602994 (±23)	16029,94±0,23	7,71787(±44)	2,5726
$_2He^4$	4,00260361 (±37)	2603,61±0,37	28,2950 (±09)	7,0740
$_2He^5$	5,012296 (±21)	12296±21	27,338 (±20)	5,4676
$_2He^6$	6,018960 (±18)	18900±18	29,259 (±17)	4,8765
$_3Li^5$	5,012541 (±40)	12541±40	26,328 (±37)	5,2656
$_3Li^6$	6,0151263 (±1)	16126,3±1,0	31,9910 (±15)	5,3318
$_3Li^7$	7,0160053 (±11)	16005,3±1,1	39,2436 (±18)	5,6062
$_3Li^8$	8,0224884 (±16)	22488,4±1,6	41,2763 (±24)	5,1596
$_6C^{11}$	11,0114313 (±15)	11431,3±1,5	73,4413 (±20)	6,6765
$_6C^{12}$	12,0	0±0	92,1605 (±27)	7,6800
$_6C^{13}$	13,0033543 (±7)	3354,3±0,7	97,1075 (±31)	7,4698
$_6C^{14}$	14,00324193 (±41)	3241,93±41	105,2835 (±33)	7,5202
$_8O^{14}$	14,00 85970 (±7)	8597,0±0,7	98,7303 (±28)	7,0522
$_8O^{15}$	15,0030719 (±19)	3071,9±1,9	111,9480 (±39)	7,4632
$_8O^{16}$	15,99491494 (±28)	5087,06±0,28	127,6170 (±35)	7,9761
$_8O^{17}$	16,9991134 (±9)	— 886,6±0,9	131,7591 (±41)	7,7505
$_8O^{18}$	17,99915983 (±34)	— 840,17±0,34	139,8059 (±49)	7,7670

* Қавс ичида сўнгги рақамлар хатолиги берилган.

изотоплар эгри чизиқдан юқорида жойлашади. Бу ҳол уларнинг структураси жуда барқарор эканлигидан далолат беради.

Мазкур эгри чизиқнинг икки ажойиб хусусияти бор. Биринчи хусусияти — масса сонлари тахминан 30 дан 120 гача бўлган кўпгина изотоплар учун эгри чизиқнинг ғоят кам ўзгаришидир, яъни барча нуклонлар учун боғланиш энергияси амалда бир хил — қарийб 8,5 *Мэв*. Бундан кўпчилик ядролар учун боғланиш энергияси ядродаги зарралар сонига пропорционаллиги келиб чиқади. Бундай хулоса ядро кучлари ғоят қисқа масофалардагина таъсирда бўлади деган фикрнинг аниқ исботидир. Агар улар электр ёки гравитацион кучларга ўхшаш узоқ таъсир этиш хусусиятига эга бўлса, бунда ҳар бир нуклон бошқа бир нуклон билан ўзаро таъсирда бўлиши ҳамда тўлиқ боғланиш энергияси масса сони квадратига қарийб пропорционаллигини кутиш мумкин эди. Иккинчи хусусияти — боғланиш энергияси эгри чизиғи ўртача оғирликдаги элементлар учун максимумга эга. Демак, мазкур элементлар ғоят барқарордир. Агар биз ўта оғир элементдан бошлаб, уни иккига ажратсак, бунда оғир ва ўртача оғирликдаги элементлар боғланиш энергиялари ўртасидаги айирмага мувофиқ келадиган энергия ажралиб чиқиши лозим эди. Шунингдек, агар ўртача оғирликдаги элементни ҳосил қилиш учун иккита енгил элементни қўша олсак, унда ҳам яна энергия ажралиб чиқар эди. Мазкур икки усул ҳам амалда ядро энергияси олишда фойдаланилмоқда, бу тўғрида кейинроқ тўхталиб ўтамиз.

Энди ўта оғир элементларда юз берадиган альфа-емирилиш проблемаси ҳақида тўхталиб ўтамиз. Бунда ҳар бир нуклонга қарийб 7,5 *Мэв* энергия тўғри келади, бироқ 15-расмдаги эгри чизиқнинг оғишига қараб, қўшимча заррачага қарийб 5,5 *Мэв* боғланиш энергияси тўғри келади, дейиш мумкин. Бу — оғир ядродан бир протон ёки бир нейтронни ажратиб олиш учун ядрога 5,5 *Мэв* энергия бериш зарур, демакдир. Агар икки протон билан икки нейтронни биттадан ажратиб олиш лозим бўлса, ядрога тахминан 22 *Мэв* энергия беришга тўғри келади. Иккинчи томондан, маълумки, альфа-зарраларнинг боғланиш энергияси 28 *Мэв* дан иборат. Борди-ю, бу зарралар биттадан эмас, балки аралашган ҳолда, альфа-зарралар шаклида чиқса, у ҳолда 6 *Мэв* соф энергия чиққан бўлар эди, чунки биз 22 *Мэв* энергия қўшиб, 28 *Мэв* энергия олишимиз керак эди. Шундай қилиб, гарчи бундай ядро протон ёки нейтрон чиқаришга кўра барқарорлик эҳтимоллигига эга бўлишига қарамай, альфа-зарралар чиқариши ҳусусида ҳали ҳам барқарормас, чунки альфа-зарралар чиққанда, ҳар доим қарийб 6 *Мэв* мусбат энергия ажралиб чиқади. Барқарормас оғир элементларнинг 4 дан 9 *Мэв* гача энергияли альфа-зарралар чиқариб емирилишининг сабаби ҳам шунда.

25-§. АЛЬФА-ЕМИРИЛИШ НАЗАРИЯСИ

Нима учун оғир ядролар бир зумда парчаланмайди? Нима учун баъзи ядроларнинг парчаланиши учун кўп йил талаб этилади? — деган саволларнинг берилиши табиийдир. Уларни қуйида кўриб ўтамиз.

Аввало кичкина чекиниш қилайлик. Табиий α-нурланувчи элементлар Менделеев даврий системасининг охирига жойлашган. Альфа-актив изотоплар мажмуасида 40 та табиий ва 100 та сунъий α-нурланувчи изотоплар бор.

Емирилиш тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$_ZX^A \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + \alpha + E_e.$$

α-емирилишнинг энергетик шарти:

$$M(Z,\ A) = M(Z-2,\ A-4) + M(_2He^4) + \frac{E_e}{c^2}.$$

Емирилиш энергияси $E_e \geqslant 0$ бўлгани учун α-емирилиш она (бош) изотопининг массаси маҳсул изотоп ва $_2He^4$ изотопининг массалар йиғиндисидан катта ёки тенг бўлгандагина вужудга келади.

α-емирилиш процесси тажрибада топилган қуйидаги иккита хусусиятга эга.

Биринчидан, α-нурланувчи элементларнинг емирилиш доимийси λ ва α-зарраларининг энергияси E_e турли чегарада ўзгаради. Масалан, уран оиласида α-емирилиш энергияси 2 мартадан бир оз кўпроқ ўзгаргани ҳолда (4 ÷ 9 *Мэв*), емирилиш доимийси 10^{-18} дан 10^{-6} *сек*$^{-1}$ гача оралиқда ўзгаради. λ ва E_e катталикларнинг ўзгаришида бундай катта фарқ бўлишига қарамай, улар ўзаро Гейгер—Нетолл қонунига бўйсунади:

$$\ln \lambda = A \ln E_e + B.$$

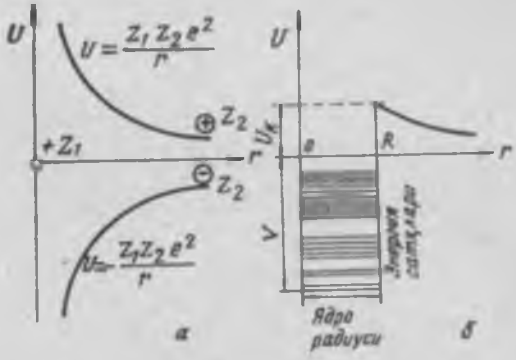
Радиоактив оилалар учун A бир хил, B эса, ҳар хил оила учун мос қийматга эга. Гейгер—Нетолл қонунидан кўриниб турибдики, α-нурланувчи изотопнинг яшаш даври қанча кичик бўлса, α-зарранинг энергияси шунча катта бўлади.

Иккинчидан, ҳар бир α-нурланувчи элемент учун ядродан чиқиб кетаётган α-зарраларнинг энергияси ўзгармас бўлади ёки жуда кам ўзгаради. Бу энергия α-зарранинг парчаланишдан сўнг ядронинг электр майдонида (итарилиш) тезланиш натижасида олиши мумкин бўлган энергиядан анча кичик бўлади. Масалан, $U^{234} \rightarrow Th^{234}$ α-емирилишда α-заррага торий ядроси четида таъсир қилувчи — итарилиш кучи потенциал энергияси 30 *Мэв* га яқин. Демак, α-зарра потенциал тўсиқдан ўтгандан сўнг камида 30 *Мэв* энергия олиб тезланиши керак. Лекин тажрибада энергияси фақат 4,2 *Мэв* га тенг бўлган α-зарралар кузатилади. Гейгер — Нетолл

қонунини қандай тушуниш керак? Нима учун чиқаётган α-зарралар энергияси нисбатан кичик?

Бу ва юқоридаги саволларга жавоб бериш учун ядро ичидаги ва унинг сирти яқинидаги потенциал энергиянинг ўзгаришини қараб чиқиш лозим.

Ядро ичида мусбат зарядланган протонларнинг мусбат заряд ташувчи ҳар бир яқин заррага нисбатан итариш кучи намоён бўлади; зарядлар ўртасидаги масофанинг қисқариши билан итарилиш кучининг орта бориши (16-*а* расм) элементар физика курсидан маълум. Итарилиш кучи мусбат потенциал энергияга мос келади, кучга қараб энергия ҳам кўп бўлади. Мусбат зарядли иккита зарранинг потенциал энергияси улар ўртасидаги масофанинг функцияси сифатида 16-*б* расмдаги эгри чизиқ билан тасвирланган. Бу ерда горизонтал ўқда зарралар ва ядро маркази оралигидаги масофа, вертикал ўқда эса, системанинг потен-



16-расм. Таъсир энергияларининг масофага боғлиқлиги:
а) икки электр заряди учун, б) ядро билан протон учун.

циал энергияси кўрсатилган. Агар зарра ядрога маълум масофада яқинлашса, потенциал энергия U ҳам ортади, натижада, итарилиш кучи ортади. Бироқ R нуқтада зарра ядро чегарасига борнб етади ва бирданига ядро кучининг жуда яқин масофада содир бўлувчи тортиш таъсирига тушиб қолади. Мазкур тортиш кучи итариш кучидан кўп марта ортиқ, демак, потенциал энергия жуда катта манфий сон V га қадар камаяди. Ҳозиргача ядро кучларининг табиатини билмаганлигимиз сабабли эгри чизиқнинг мазкур пасайиш еридаги аниқ формасини белгилаш қийин. Муҳимн шундаки, электр кучининг таъсири туфайли, ядро атрофида потенциал тўсиқ мавжуд бўлади. Ташқаридан келувчи зарядланган ҳар бир зарра ядро ичига кирнши учун бу тўсиқни бартараф этиши, бошқача айтганда, у R нуқтанинг баландлик тўсигнга тенг келадиган даражада энергияга эга бўлнши керак.

Шунга ўхшаш, ядро ичидаги зарра сиртга чиқиши учун тўсиқни енгиб ўтиши керак. Бу ерда «тўсиқ» термини тимсол тарзида қўлланилганини айтиб ўтиш керак. Албатта, ядро атрофида ҳеч қандай моддий тўсиқ йўқ, бироқ ядро атрофидаги электр кучи шундайки, агар уларни соф механик кучлар билан алмаштирилса, уларнинг таъсири тўсиққа тенг келади. Тўсиқ потенциалнинг катталиги ядро заряди ва радиусига боғлиқ; оғир ядрода у 95 *Мэв* га яқин. Юқорида айтиб ўтилганидек, ядродан учиб чиқадиган альфа-зарра қарийб 6 *Мэв* энергияга эга бўлиши керак. Бу миқдор потенциал тўсиқдан анча паст, демак, зарра ядро доирасидан ташқарига чиқа олмайди. Агар классик физика қонунларига риоя қилинса потенциал тўсиққа нисбатан кам энергияга эга бўлган альфа-зарра ядродан ҳеч қачон ташқарига чиқа олмасди ва биз альфа-нурланишни кузатмаган бўлар эдик.

Биз кузатаётган альфа-нурланиш ҳодисаси янги тўлқин механикаси нуқтаи назаридан шарҳланиши лозим. Бу механикага кўра, нурланиш кўпинча модда тарзида, модда эса — нурланиш тарзида намоён бўлади. Бу назарияга мувофиқ, альфа-зарралар ҳаракати тўлқин ҳаракати сифатида, потенциал тўсиқ доирасидаги бўшлиқ эса тўлқин кириб борадиган ношаффоф муҳит тарзида таърифланиши мумкин. Ҳақиқатан ҳам, ядро атрофида тўсиқ мавжуд деб фараз қилсак, у ҳолда бу тўсиқ девори ичида у ёқдан-бу ёққа ҳаракат қилаётган ва тўсиқ деворига урилаётган альфа-зарраларни кўришга муяссар бўлар эдик. Мазкур тўқнашувларнинг кўпчилигида альфа-зарралар орқага қайтарилади, бироқ ҳар ҳолда, $1 : 10^{14}$ миқдорида альфа-зарралар тўсиқдан ўтиб, ташқарига чиқишади. Шундай қилиб, альфа-зарранинг тўсиқни енгиб чиқиши тасодифий бўлиб, муайян моддадаги баъзи атомлар жуда тез, бошқалари эса ғоят узоқ вақт давомида парчаланишининг сабаби ҳам шунда. Тўсиқ орқали альфа-зарраларнинг ўтиши шу тўсиқнинг қалинлигига ҳам боғлиқ. Катта энергияли альфа-зарралар юпқа девордан осонгина ўтади. Бу мулоҳазаларга асосан, юқори энергияли альфа-зарралар чиқарадиган радиоактив моддаларнинг ярим емирилиш даври анча қисқа бўлади, кам энергияли альфа-зарралар чиқарадиган модданинг ярим емирилиш даври эса, анча узоқ бўлади, дейиш мумкин. Ҳақиқатан ҳам, альфа-зарралар энергияси билан муайян модданинг ярим емирилиш даври ўртасида шундай нисбат мавжуд бўлиб, у «Гейгер — Неттол қоидаси» номи билан юритилади.

Бу эмпирик қоида альфа-емирилиш назарияси яратилгунга (1928 йилга) қадар шарҳланмаган эди. Мазкур назария барча фактларни сифат томондангина эмас, балки миқдор жиҳатдан ҳам изоҳлайди. Уранга нисбатан анча оғир бўлган элементлардаги альфа-зарранинг энергияси анча юқори, демак, бундай элементларнинг ярим емирилиш даври қисқа бўлиб улар бизнинг давримизгача сақланмаган.

26-§. БЕТА-ЕМИРИЛИШ НАЗАРИЯСИ

Бета-емирилиш назарияси анча ўзгача, чунки бунда ядродаги зарралар чиқмайди, балки бир хил нуклон бошқа нуклонга айланади ва бунинг натижасида электрон ва нейтрино чиқади. Мазкур процессда ҳосил бўлувчи электрон ва нейтрино билан нуклонлар ўртасидаги ўзаро таъсирни кўздан кечириб, муайян ядронинг бета-емирилишига учрашини ҳисоблаб чиқариш мумкин экан. Юқорида кўрсатиб ўтилганидек, бу назария гарчи эксперимент ал далиллар асосида яхши изоҳланса-да, бироқ унинг сифат томонлари яхши эмас эди ва бу ҳол мезонларнинг яшашини асос қоида қилиб олиш зарурлигини келтириб чиқарди.

Энди оғир элементлар орасида бета-емирилишнинг нима учун α-емирилишдан сўнг кузатилиши тушунарли. Бир қанча альфа-емирилишлардан кейин қолган ядролар тенг миқдордаги нейтронлар ва протонларни йўқотишн туфайли дастлабки ядролардан фарқ қилади. Оғир элементлардаги барқарор ядроларда протонларга нисбатан нейтронлар кўпроқ бўлади, шунинг учун бир хил миқдорда нейтрон ва протонларнинг йўқолиши янги ядрода нейтронлар ва протонлар сонларининг нисбати тегишли барқарор ядрога мос келадиган нисбатдан юқорироқ бўлишини кўрсатади. Бу номуносиблик нейтронлардан бирининг айни вақтда электрон ва нейтрино чиқариб, протонга айланиши йўли билан бартараф этилиши мумкин. Альфа-емирилиш ҳодисаси, юқорида кўриб ўтганимиздек, квант механикасида осон тушунтирилади. Агар ядро ичидаги альфа-зарранинг энергияси нолдан катта бўлса, у потенциал тўсиқ орқали ўтиш эҳтимоллигига эга бўлади. Бунда ядронинг заряди икки бирликка, масса сони эса тўрт бирликка камаяди.

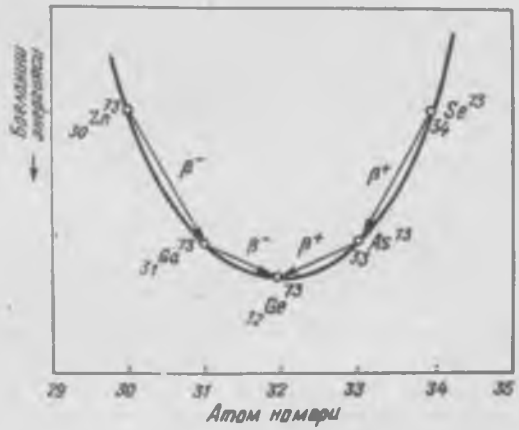
Бета-емирилиш ҳодисасини эса тушунтириш бир оз қийин. Радиоактив силжиш қоидасига асосан β^--емирилишда ядронинг заряди бир бирликка ортади; масса сони эса ўзгармай қолади (17-, 18-расмлар). β^--айланиш атом ядросида бўладиган процессдир. Иккинчи томондан, бизга маълумки, β^--нурлар электронлар оқимидан иборат. Бироқ ядрода электрон йўқ.

Нейтроннинг мавжудлигини аниқлангунга қадар ядрони протонлардан ва электронлардан ташкил топган деб ҳисобланар эди. Бу нуқтаи назардан β-айланиш жуда оддий тушунтирилади. β^--зарра ядро электрони деб ҳисобланар эди ва β^--емирилиш ядродан битта электроннинг чиқиши билан тушунтирилар эди. Бироқ ядронинг протон-электрон модели қатор қийинчиликларга дуч келди ва шунинг учун ундан фойдаланилмай қўйилди.

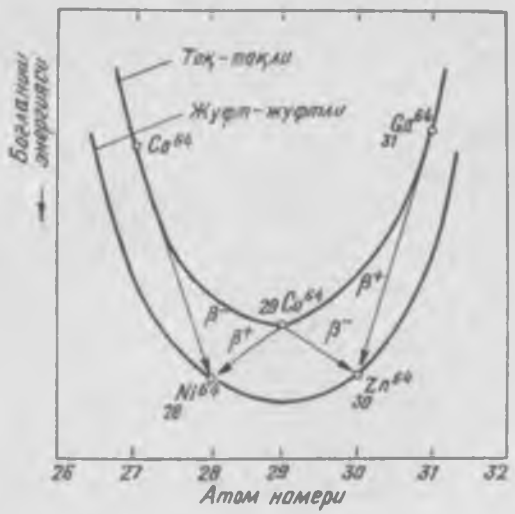
Агар β^--электрон ядродан чиқмаса, β^--емирилишни қандай қилиб тушунтириш мумкин? β^--зарра қаердан пайдо бўлади? Равшанки, β^--зарра атом қобигидаги электрон эмас, ваҳоланки электроннинг қобиқдан чиқарилиши атомнинг химиявий табиатини ўзгаришига олиб келмайдиган атом ионизациясидир. Вақт ўтиши

билан ион ўзига ташқи муҳитдан электрон қабул қилиб олиб, нормал атом бўлиб қолади.

Гарчи β^--зарра ядродан чиқмас экан ва у атом қобиғидан чиқарилган электрон эмас экан, биз β^--электронларни ядронинг ичида бўладиган процесслар натижасида ядродан ташқарида ҳосил бўлади деб, хулоса қилишимиз керак. Шундай экан β^--емири-



17-расм. Масса сони тоқ бўлган изобарларнинг хоссалари.



18-расм. Масса сони жуфт бўлган изобарларнинг хоссалари.

лишда ядронинг ичида қандай процесслар бўлади? β^-- емирилиш реакцияси қуйидаги формула орқали ифодаланади:

$$_ZX^A \rightarrow _{Z+1}Y^A + e^-. \qquad (22)$$

(22) формула β^-- айланиш вақтида системанинг тўла заряди ўзгармаслигини кўрсатади.

β^-- айланишда ядро зарядининг бир бирликка ортиши ядрода содир бўладиган процесслар натижасида протонлар сонининг бир бирликка ортишини билдиради. Аммо масса сони ўзгармаганлиги учун, равшанки, нейтронлар сони ($N=A-Z$) бир бирликка камаяди. Демак ядрода содир бўладиган β^-- айланиш, ядродаги нейтронлардан бирининг протонга айланиши каби ифодаланиши мумкин, яъни $n \rightarrow p+\beta^-$. Бу айланиш натижасида энергия ажралиб чиқиши мумкин (акс ҳолда бундай процесс ўз-ўзидан бўлиши мумкин бўлмай, ядрога ташқаридан энергия бериш керак бўлар эди). Агар ядрода протонлар сони нейтронга нисбатан кўп бўлса, протоннинг нейтронга айланиши юз беради:

$$p \rightarrow n + \beta^+.$$

(Бундай айланиш фақат ядронинг ичидагина содир бўлиб, эркин ҳолда протон мутлоқ барқарор заррадир.) Бу ҳодиса позитрон β^+ емирилиш деб аталади. Бунда ядро массаси ўзгармайди, заряди эса бир бирликка камаяди (17- ва 18- расмлар). β^+- емирилишидаги энергетик шарт:

$$E_{\beta^+} = M(Z, A) - M(Z-1, A) - Zm_e.$$

β^-- емирилишнинг энергетик шарти [$E_{\beta^-} = M(Z, A) - M(Z+1, A)$] дан фарқ қилади. Шунинг учун β^-- емирилиш «она» ядро массаси маҳсул «қиз» ядро массасидан катта бўлгандагина юз беради.

β- емирилишнинг учинчи, сўнгги хили электрон—ютиш ҳодисасидир. Протонлари нисбатан ортиқча бўлган «она» ядро атомнинг электрон қобиқларидан бир электронни қамраб олади, «ютади». Бу ҳолда ҳам, позитрон — емирилишда бўлганидек, битта протон нейтронга айланади:

$$p + e^- \rightarrow n$$

Электрон атомнинг қайси қобиғидаи ютилса, шу қобиқнинг номи билан K- электрон, L- электрон ва ҳоказо ютилиш деб юритилади. Электрон ютилганда тартиб номер бирга камаяди, бир электрон йўқолади. Энергия шартн қуйидагича ёзилади:

$$E_k = M(Z, A) - M(Z-1, A),$$

Бу ерда K индекси атом қобиқларининг белгиси. k- ютилиш «она» изобарнинг массаси маҳсул (қиз) изобарнинг массасидан кўпроқ бўлганда кузатилади:

$$_ZX^A \rightarrow _{Z-1}Y^A.$$

27-§. БЕТА-ЕМИРИЛИШ СПЕКТРИНИНГ ШАКЛИ ВА НЕЙТРИНО ҲАҚИДАГИ ГИПОТЕЗА

Энди яна бета-емирилиш ҳақида сўзлаб, ядродан чиқиш вақтида электрон ва позитрон қандай ҳосил бўлишини шарҳлашимиз лозим. Бу эса ядро физикасидаги энг мураккаб масалалардан бири бўлиб, ядро кучлари проблемасига боғлиқдир. Ядро компонентлари бўлмиш протон ва нейтронлар кундалик ҳаётимизда маълум бўлган электр ва гравитацион кучларга мутлақо ўхшамайдиган маълум ва ўзига хос тортилиш кучлари орқали бир-бирига таъсир этади. Биринчидан, бу кучларнинг таъсири жуда қисқа масофада, яъни ядродаги икки зарра бир-бирига жуда яқин келгандагина намоён бўлади. Бунда агар зарралар бир-биридан бир оз узоқлашса борми, уларга ядро кучлари таъсир қилмай қўяди. Иккинчидан, бу кучлар алмашинувчи характерга эга, яъни зарралар ўзларидаги баъзи хусусиятларига кўра, бир-бирига тортилади ва кучлари алмашинади. Бу хусусиятлар уларнинг ўхшашлигидан далолат беради; масалан, протон нейтронга, нейтрон эса протонга айлана олади.

Демак, протон ва нейтрон айни бир зарранинг икки турли ҳолатларидир: биринчи ҳолатда у протон бўлса, иккинчисида нейтрон бўлади, деган хулосага келиш мумкин. Тез нейтронларнинг водород атомлари билан тўқнашуви ҳақидаги кузатишлар нейтрон ва протонларнинг алмашинувини тўла тасдиқлади.

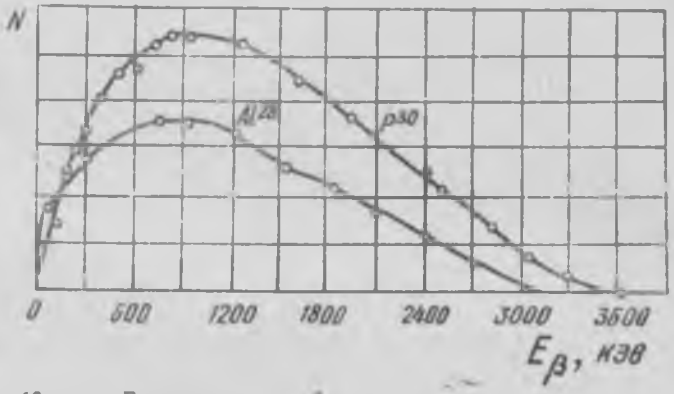
Юқорида баён этилган алмашиниш жараёнидан кўринишича, ядро таркибида бирор ўзгариш ҳам, нур тарқалиши ҳам юз бермайди. Баъзан зарраларнинг бир-бири билан алмашинмагани ҳолда ўзгариш содир бўлади. Бундай ўзгариш барқарор бўлмаган, яъни радиоактив ядролардагина кузатилади. Радиоактив ядролар нотекис тузилган: улар ё ортиқча нейтрон, ё ортиқча протонларга эга.

Борди-ю, нейтронлардан бири протонга айланса, биринчи ҳолда ядронинг нотўғри тузилиши тўғриланиши мумкин. Бунда зарядлар мувозанатини сақлаш учун ҳосил бўлган электрон ядрода тура олмайди ва ундан тезликда чиқиб кетади. Бу ҳолда бета-нурланиш юз беради. Шунга ўхшаш, агар ядрода ортиқча протонлар бўлса, улардан бири нейтронга айланиши мумкин. Бунда мусбат электрон ҳосил бўлади ва тезда ядродан чиқиб кетади. Баъзи бир радиоактив элементларнинг мусбат электронлар тарқатиши ана шундай изоҳланади.

Шуни айтиш керакки, нейтроннинг ўзи беқарор заррадир. У узоқ вақт ядродан ташқарида бўлса, ўз ҳолича протон ва электронга ажралади. Умуман олганда, бета-емирилиш қатор мураккаб муаммоларни ечишни тақозо этади. Булардан бири ядродан ажралиб чиқаётган электронлар энергияси масаласидир. Радиоактив атом бета-нурлар тарқатиб емирилганида электронлар катта энергия билан отилиб чиқади. Бу энергияни турли усул билан, масалан, магнит майдонида электронларнинг оги-

шини ўлчаш йўли билан аниқлаш мумкин. Квант назариясининг асосий қонунларига мувофиқ, ядрода муайян миқдордагина энергия бўлади.

Ҳақиқатан ҳам, ядро доим муайян дискрет миқдорда энергияга эга бўлган альфа зарралар ва гамма-нурлар тарқатади. Шу сабабли бета-нурланишда ҳам айнан шу ҳолни кузатиш мумкин. Аниқланишича, муайян изотоп ядроси чиқарадиган электронлар нолдан то маълум бир максимал миқдоргача бўлган узлуксиз энергия спектрига эга экан. 19-расмдаги эгри



19-расм. Бета-спектрнинг кўринишн.

чизиқ Al^{28} ва P^{30} нинг бета-нурлари учун хос бўлган энергия тақсимланишини кўрсатади. Горизонтал шкалада энергия, вертикал шкалада эса, электронлар сони кўрсатилган. Бундан чиқадики, муайян дискрет миқдор ўрнига энергиянинг узлуксиз тақсимланиши кузатилади. Бироқ гап энергия спектрининг узлуксизлигндагина эмас, балки энергиянинг исроф бўлаётганида ҳамдир. Бета-айланишда ажралиб чиққан энергия миқдорини, кўпинча бошқа маълумотлар асосида ҳисоблаб чиқиш мумкин бўлади. Бета-нурлар энергияси ана шу миқдорга тенг бўлиши керак.

Аслида тўлиқ ажралиб чиққан энергияни ҳар гал ҳисоблаганда у спектрнинг юқори қийматига тенг бўлиб чиқади ва 4-расмда кўрсатилганидек, барча электронлар мазкур қийматдан кам энергия билан тарқалади. Шундай экан, қолган энергия қаёққа йўқолади, деган саволнинг туғилиши табиий. Физиканинг асосий қонуни бўлмиш энергиянинг сақланиш қонуни бета-емнрилиш шароитнда бузилади. Ҳаракат миқдори моментининг сақланиш ёкн спин қонуни ҳам гўё бузилгандек бўлади. Бета-емирилишда бурчак моментининг маълум бир улуши ҳам йўқолгандек бўлади.

Бу икки асосий қонуннинг мустаҳкамланишига эришиш учун хоссалари бета-емирилишнн шарҳловчи фикрни қўйишга имкон

бера оладиган заррани «ўйлаб топиш» талаб этилади. Бу борада швейцариялик физик Вольфганг Паули қуйидагича мулоҳаза юритади. Агар бета-емирилиш хусусиятлари сақланиш қонунларига тўғри келмас экан, демак, бу процесс нотўғри талқин этилган. Емирилиш вақтида энергияси ва ҳаракат миқдори кам бўлган кўзга кўринмас нейтрал зарра ҳам иштирок этади. Лекин бу ҳол тажриба давомида сезилмайди. Ҳар бир процессда ҳамма зарраларнинг муайян энергия йиғиндиси ажралиб чиқади ва бу энергия зарралар орасида ихтиёрий тақсимланади, электронга эса турли шароитда шу энергиянинг ҳар хил улуши тўғри келади.

Шундай қилиб, бета-емирилишда $n \to p + e^-$ — эмас, балки $n \to p + e^- + x$ кузатилади, бунда x — бирор нейтрал зарра. Энрико Ферми бу заррани «нейтрино» деб атади. Бу итальянча «нейтралча» демакдир. Ҳозир бу зарра «антинейтрино» дейилади. Протоннинг парчаланишида ($p \to n + e^+ + \nu$) пайдо бўлган зарра (ν) «нейтрино» деб юритилади.

Маълум бўлишича, нейтрино ва антинейтрино фотон каби ҳаракатсизлик массасидан маҳрум бўлиб, $^1/_2$ спинга эга. Демак, улар фермионлардандир.

Электрон ва антинейтрино энергиясининг мажмуи айнан нейтрон ва протон массасининг айирмасидан иборатдир. Лекин электрон энергияси ғоят турлича бўлиши мумкин, чунки у бир емирилиш иккинчи емирилишга қадар электрон ва нейтрино ўртасида турли миқдорда тақсимланади.

Демак, энди ҳаммаси мантиқий ва қатъийдир. Элементар зарралар сонининг ортиши ҳисобига сақланиш қонунлари ўзгармай қолди. Аммо нейтрино ҳам «шунчаки» кашф этилгандир. Назарий жиҳатдан олганда унинг хоссалари тажрибага асосланмай, балки исботсиз қоидалаштирилган. «Нейтралча»нинг мавжудлигини тажриба йўли билан қайд қилиш лозим эди. Қандай қилиб? Нейтрино — ажойиб зарра. Ядронинг ички структураси ҳақидаги ҳамма билимларимиз қанчалик кам бўлмасин, бироқ у нейтрино ҳақидаги маълумотларимизга нисбатан жуда бойдир. Нейтринонинг ички структурасини деярли билмаймиз. Нейтрино ва антинейтрино электрон ва позитрон каби турли зарраларни ёки чап қутбли, ёки ўнг қутбли фотонлар сингари айни бир зарранинг ўзими, деган мунозара ҳозирга қадар давом этмоқда.

Бу ҳақда батафсил фикр юритиш лозим. Ёруғлик электромагнит майдонининг тебранишидан иборат бўлганлиги учун, электр ва магнит векторлари тебранишининг йўналиши ҳақида гапириш мумкин. Вектор фақат ёруглик тарқалишига перпендикуляр йўналишда тебраниши мумкин. Шунинг учун ҳам мавжуд икки йўналишдан бирини танлаб олиш керак.

Текисликдаги ҳар қандай тебранишни икки айланма ҳаракатнинг мажмуи деб қараш мумкин: бири соат стрелкаси йўналиши бўйича, иккинчиси — унга тескари йўналишда. Бунда икки типли фотонлар бўлиши эҳтимол. Улардан бирининг ҳаракатини

ўнг винтнинг пастга (кирнш) томон буралишига, иккинчисининг ҳаракатини эса чап винтнинг (чиқиш) буралишига таққослаш мумкин.

Биринчи фотон — чап қутбли ёки ўнг спиралли; иккинчиси — ўнг қутбли ёки чап спираллидир. Уларни оддийгина қилиб, ўнг фотон ва чап фотон деб айтиш ҳам мумкин. Атом ўзидан чап ва ўнг фотонларни бир хил миқдорда чиқаргани учун ҳам табиатда улар тенг тақсимланган бўлади.

Фотонлар қутбланишини винт билан таққослаш, спинни пилдироқ билан таққослашга ўхшашдир. Тўғрисини айтганда, винт — ўз ўқи атрофида айланувчи пилдироқ деган гап. Қутбланиш ва спинни бир-бири билан таққослаш бежиз эмас. Бунда улкан физик асосга эга бўлган табиий ўхшашлик яширинган. Агар бу ўхшашлик бўлмаганда эди, биз фотон спини (электрон ва протон спинлари) ҳақида сўзлай олмасдик.

Яна нейтринога қайтамиз. Бу зарранинг сезилмаслиги фақат ҳаракатсизлик массаси ва зарядининг йўқлигидан эмас, балки унинг ниҳоят даражада сингиш қобилиятидадир. Бу хусусда микродунёда нейтринога тенг келадигани йўқ. Бу «зарра-чемпион» ва айни вақтда «зарра-шарпа» ҳамдир. У ўта қалин жисмлардан ҳам бемалол ўта олади.

Нейтринонинг «назарий» жиҳатдан пайдо бўлиши билан мазкур зарранинг мавжудлиги тажрибада исботлангунига қадар орада йигирма беш йил ўтди. СССР Фанлар Академиясининг академиги Б. М. Понтекорво ўша даврда нейтринонинг мутлақо моддийлигини ва ўша давр техникасига боғлиқ ҳолда нейтринонинг «кўринмаслиги» вақтинчалик эканлигини ҳисобга олмаган одамлар ҳам топилганлигини эслайди.

Нейтринони тутишнинг ғоят мушкуллигини шарҳлашда бирор натижа чиқариш учун қалинлиги бир километр бўлган қаттиқ жисмдан миллиардлаб нейтрино ўтказиш керак. Натижада, мутлақо ҳал этиб бўлмайдигандек туюлган бу масала ҳам ҳал этилади. Агар турткн протоннинг чиқиши, яъни унинг тезлиги кузатилса, табиийки, ёлғиз электроннинг ўзи ёки электрон нейтрино билан бирга отилганлигига боғлиқ ҳолда турткн протонларнинг тезлиги ҳам ҳар хил бўлишини биринчи марта Совет физиги А. И. Лейпунский кўрсатган эди. Протонларнинг тезлигини ўлчаш ядронинг парчаланиш вақтида бир ёки икки зарра ажралиб чиқишини аниқ кўрсатди. Ўзига хос бўлган бу тажрибани экспериментал техниканинг ўша вақтдаги даражасида амалга ошириб бўлмасдн. 1948 йилга келиб, Аллен бу нозик тажрибани амалга оширншга муваффақ бўлди.

Тажрибанинг аниқ ва қизиқарли бўлишига қарамай, нейтринонинг моддалар билан ўзаро таъсири масаласи очиқлнгича қолиб кетди.

Физик назариётчнларга космик нурлар эмас, балки тадқиқотчилар ёрдамга келди. Атом энергиясининг техник жиҳатдан ўзлаштирилишига боглиқ бўлган нейтрон физикасининг жадал

ривожланишигина энг ажойиб тажрибаларидан бирини ўтказишга имкон берди.

Атом реакторида (институт лабораториясида, «Ленин» атом муз ёрари бортида, атом электростанциясида, ядро ёнилғиси ишлаб чиқарувчи заводда ўрнатилганлигидан қатъи назар) биргина асосий процесс амалга оширилади: радиоактив моддалар ядроси нейтрон билан парчаланади. Бундай парчаланишнинг ҳар бир актида бета- радиоактивликка эга бўлган бўлакчалар — бир қанча ядро ҳосил бўлади. Агар нейтрино ҳақиқатан мавжуд бўлса, бундай ядро парчаларида нейтронлар юқорида келтирилган $n \to p + e + \bar{\nu}$ реакцияга мувофиқ парчаланиши лозим; бунда $\bar{\nu}$ антинейтринодир.

Фараз қилайлик, атом реактори 300 минг *квт* қувватга эга бўлсин. Шунга кўра антинейтрино олиб кетадиган энергия 10 минг *квт* ни ташкил қилади. Бу жуда кўп, албатта. Бироқ шунда ҳам зарра — шарпани тутиш ғоят мушкул иш.

Антинейтрино оқими келтирган энергиянинг ҳеч бўлмаганда ярмини иссиқлик тарзида ажратиш учун массаси 10^{60} тонна бўлган ютувчи модда керак-да. Бу Қуёш массасидан $5 \cdot 10^{32}$ марта кўп деган сўз.

Агар модданинг исишини қайд қилиш мумкин бўлмаса, антинейтрино ҳосил қилган айрим ҳолларнигина белгилаш йўлига тушиш лозим.

Назариётчилар мутлақо нейтрино ва антинейтрино (агар улар мавжуд бўлса) юзага келтирадиган қизиқарли ядро процесси бўлиши мумкин эканлигини олдиндан айтиб бердилар. Бу процесс бета-емирилишга зиддир. У қуйидагича ифодаланади: $\bar{\nu} + p \to n + e^+$.

Бундаги ҳамма зарралар бизга маълум, бироқ уларнинг водород атоми ядроси билан учрашуви мумкинлигини инкор этиб бўлмайди. Бундай процессининг мумкинлигини ҳисоблаб чиқиш қийин эмас. Агар ҳисобда берилган ўша миқдорлар тажрибада ҳам қайд этилса, бас, тажриба муваффақиятли чиқди, антинейтрино мавжуд деб айтиш мумкин.

Ҳозирда кучли антинейтрино манбаи мавжуд. Бу юқорида гапириб ўтилган реакторнинг ўзгинасидир. У секундига $5 \cdot 10^{19}$ антинейтрино чиқаради. Реактордан 10 метр нарида жойлашган ҳар бир квадрат сантиметр сиртга секундига 10^{13} антинейтрино тўғри келади. Бундай антинейтрино оқими билан бир тонна водородли модда (протонлар тўплами) бомбардимон қилинганда, ҳисобларга кўра, соатига 100 протоннинг нейтронга айланишини қайд қилиш мумкин.

Назарий қарашлар ўзини сўзсиз оқлади. 1957 йили америкалик физиклар Райенс ва Коуэн бу ажойиб тажрибани амалга оширишди.

Нейтрино оқими электр зарядига эга бўлган зарраларнинг ўтишида сцинтилляцияланадиган водородли модда солинган цистернага йўналтирилди. Сингдирувчида ҳар бир сцинтилля-

ция сезгир фотоэлемент ёрдамида қайд қилиб турилди. Антинейтрино протон билан учрашганида протон нейтрон ва позитронга айланди. Позитрон сцинтилляция бериб, фотоэлементда қайд қилинди. Айни вақтда нейтрон модда ичида юради ва тўқнашиш натижасида унинг тезлиги борган сари камаяверади. Унинг тезлиги маълум даражагача пасайганда, у модда атомига ютиладн. Бундай ютилиш атом энергиясини оширади ва айни вақтда гамма-квант нурлар тарқатади, сўнгра у ҳам қайд қилинади.

Демак, антинейтрино билан протоннинг ўзаро тўқнашуви натижасида икки марта ёруғлик портлаши кузатилади. Улардан биринчиси ўша замон, иккинчиси эса бир оз кейинроқ қайд қилинади. Тадқиқотчилар ҳар бир учқунни кузатиш учун юздан зиёд фотокучайтиргичдан фойдаландилар. Ядро физикасн соҳасидаги текширишларда биринчи марта шундай катта ўлчамда ютувчилар қўлланди. Кичикроқ сцинтиллятор жуда оз ҳодисаларигина қайд қилиш имконини беради. Шуни айтиш керакки, бундай мураккаб, ноёб тажрибани тайёрлашга беш йилдан кўпроқ вақт сарф бўлди.

Нейтрнноннг ҳақиқатан ҳам мавжудлигини узил-кесил ҳал этиш учун нейтрино ва антинейтрино турли хил зарраларми, деган масалани ҳал қилиш лозим эди. Б. М. Понтекорво буни оригинал йўл билан ҳал қилнш мумкин, деган фикрни айтди.

Хўш, антинейтрино ва нейтрино деганда нимани тушунмоқ лозим? Ҳозирга қадар антинейтрино — бу бета-емирилишда электрон билан бирга тарқаладиган заррадир, деб қараларди. Бета-плюс-емирилиш деб аталадиган бошқа бир емирилиш протоннинг ўз-ўзидан нейтрон, позитрон ва нейтринога айланиши билан характерланади.

Қўлланаётган терминлар ҳам тасодифан олинмаган. Биз зарраларни бошқача номлар билан атаганимизда ҳам моҳият эътибори билан бирор ўзгариш рўй бермасди. Айтайлик, электрон мусбат зарядга, позитрон эса манфий зарядга эга бўлсин, бироқ бу ҳол муҳим бир ўзгариш яратмайди. Демак, гап терминологияда эмас, балки фарқларни тўғри тушунишдадир. Тўғри, нейтринони антинейтринодан ажратдик-ку, аммо бу зарралар бир хилми ёки қандайдир физик хоссалари жиҳатидан бир-биридан фарқланадими, деган саволга жавоб берганимизча йўқ. Элементар зарраларда электр зарядидан ташқари бошқа типдаги зарядлар ҳам борлиги ҳақида (бир оз кейинроқ) фикр юритганимизда жумбоқ узил-кесил ечилади. Ҳозирча «нейтрино заряди» деган термин устида тўхтаб ўтамиз. Шу «нейтрино заряди»ни аниқлашни тақозо этилади. Агар нейтрино ва антинейтрино қарама-қарши «нейтрино зарядлари»га эга бўлса, у вақтда уларни бири иккинчисига ўхшамаган мустақил зарралар деб, агар улар нейтрал бўлса, бунда уни айни бир зарра, деб талқин қилиш мумкин.

Қуйидаги реакциядан тажриба принципини билиб олса бўлади:

$$\nu + p \to n + e^{+} \text{ ёки } \tilde{\nu} + n \to p + e^{-}.$$

Кўриниб турибдики, иккала реакция ҳам нейтринонинг антинейтрино билан ва, аксинча, антинейтринонинг нейтрино билан оддий алмашинувидан ҳосил бўлган. Агар зарралар ўртасидаги фарқ юзаки бўлса, табиийки, реакция бемалол амалга оширилаверади. Агар нейтрино ўз ички хоссаларига кўра, антинейтринодан кескин фарқланса, бундай реакцияларни амалга ошириб бўлмайди. Бу масалани ҳал этиш учун, жуда бўлмаганда, реакциялардан бирини текшириб кўриш кифоя қилади. Нейтринонинг бой манбаи (улкан антинейтрино оқими ҳосил қилувчи атом реакторларидан фарқли ўлароқ) бўлмагани учун иккинчи реакцияни текшириб кўришга тўғри келади.

Бу текшириш Райенс ва Коуэн ўтказган тажрибага ўхшаш бўлиши керак. Водородда протон мавжуд бўлиб, нейтроннинг эса йўқлиги сабабли у протон манбаи бўлиб хизмат қила олади. Лекин соф нейтрон манбаи йўқ. Демак, атом ядроси ичидаги мавжуд нейтронлар реакциясини ўрганиш учун бизга маълум бўлган тажрибани ғоят мураккаблаштиришга тўғри келади. Яқинда антинейтринонинг хлор — 37 ядроси билан ўзаро таъсирини ўрганиш устида иш олиб бораётган америкалик олим Девис бу тажрибани синаб кўрди. Аниқланишича, $\nu + Cl^{37} \to Ar^{37} + e^{-}$ ни амалга ошириб бўлмас экан. Бундан нейтрино ва антинейтрино «нейтрино заряди»нинг қарама-қарши ишораларига эга бўлган мустақил зарралардир, деган хулосага келиш мумкин.

Ҳозирча «нейтрино заряди» табиати физикларга маълум эмас. Шуниси ҳам борки, нейтринонинг антинейтринодан фарқи фақат «нейтрино заряди» дагина эмас. Бу ҳақда бирмунча кейинроқ батафсил тўхтаб ўтамиз.

28-§. ИЧКИ КОНВЕРСИЯ. ЯДРО ИЗОМЕРИЯСИ

Табиий радиоактив изотопларни ўрганишда альфа- ва бета-зарралар билан бирга гамма-нурлар, яъни квантлари, тинч ҳолатдаги массага эга бўлмаган нейтрал электромагнит нур пайқалган эди. Гамма-нурни оддий кўз билан кўриб бўлмайди; унинг энергияси рентген нурининг энергиясига қараганда жуда катта бўлиб (ундан юзлаб марта ортиқ) қисқа тўлқинлидир. Элементдан гамма-нурнинг нурланиши уни бошқа элементга айланишига олиб келмайди. У фақат қўзғолган ядронинг бир энергетик сатҳдан бошқа пастроқ жойлашган ҳолатга ўтишидаги энергиянинг ўзгаришига боғлиқ. Одатда, альфа- ва бета-емирилишда гамма-квантлар нурланади, чунки радиоактив емирилиш вақтида ҳосил бўладиган ядро қўзголган ҳолатда бўлади.

Ядронинг гамма-квантларни нурлатиши ички электрон конверсия процесси билан боғлиқ. Бу процесс шундан иборатки, қўзғолган ядро гамма-квантларни нурлатмасдан, ўз энергиясини ядрога яқинроқ жойлашган қобиқдаги электрондан бирига бевосита беради, натижада электрон атомдан узилиб чиқади. Конверсиянинг эҳтимоллиги ички конверсия коэффициенти (альфа) билан характерланади. Бу коэффициент электрон нурлатиб бўладиган айланишлар сонининг гамма-квантлар нурлатиб бўладиган айланишлар сонига бўлган нисбатига тенг. Бу ҳолда электроннинг қайси қобиқдан узилиб чиққанига қараб K ва бошқа қобиқлардан конверсия ўтишга бўлинадилар (конверсия коэффициентлари α_K, α_L,...).

Ички конверсиядан сўнг характеристик рентген нури ва оптик спектрал чизиқнинг қайта нурланиши бошланади, чунки атом қобиғидаги электрондан бири ядро яқинида бўшаган жойга ўтади, бошқа электрон «қочоқ» электрон ўрнига ўтади ва ҳоказо.

Ички конверсия ҳодисасида ядронинг уйғониш энергияси электроннинг ядро билан боғланиши $\mathcal{E}_e$ ни енгишга ва унинг кинетик энергияси E_e га сарф бўлади:

$$h\nu = E_e + \mathcal{E}_e$$

Ядронинг уйғониш энергияси ва атом қобигида боғланиш энергияси фақат муайян қийматларга эга бўлганлиги учун ички конверсия вақтида электронларнинг дискрет энергетик спектри ҳосил бўлади. β-емирилишнинг ички конверсиядан асосий фарқи ҳам мана шу.

Радиоактив изотопнинг альфа- ёки бета-емирилишида ёки турли ядро реакцияларида ҳосил бўлувчи атом ядролари қўзғолган ҳолатларининг яшаш даври одатда жуда кичик бўлиб, 10^{-15} — 10^{-12} *сек* гача боради. Баъзи ҳолларда эса ана шундай ҳолат анча узоқ (ўнлаб йилларга) давом этиши ҳам мумкин. Яшаш вақти 10^{-9} *сек* дан ортиқ бўлган турғун ёки радиоактив ядронинг қўзғолган ҳолати *ядро изомери* деб аталади. Изомер емирилишининг икки тури мавжуд. Бир турида изомер ядроси асосий ҳолатдаги ядро каби емирилади (масалан, β^- ёки β^+ емирилиш, электрон қамраш), бунда ярим емирилиш даври ва чиқадиган зарра энергияси бошқача бўлади. Изомер емирилишининг бошқа тури шундан иборатки, изомер ядроси гамма-нурни чиқариб, асосий изотоп ядросига айланади. Баъзида изомер ядронинг бу икки емирилиш тури бирга учрайди.

Бета-емирилиш вақтида Pa^{234} дан Th^{234} пайдо бўлади. Бундай емирилиш вақтида $P_a{}^{234}$ билан биргаликда қўзғатиш энергияси 0,4 *Мэв* га яқин бўлган Pa^{234} изотопининг яна бошқа қўзғолган ҳолати ҳосил бўлади. Pa^{234} изотопи ярим емирилиш даври 6,7 соат бўлган β^--емирилишга дуч келса, қўзғолган бета-радиоактив ядронинг ярим емирилиш даври бошқача бўлади. Унинг энергияси эса 1,15 *Мэв* га тенг. Шунинг учун $P_a{}^{234}$ нинг қўзғолган ҳолати

мустақил изомер номини олди. Буни 1921 йилда Ган аниқлаган эди. Изомер ҳолатнинг аниқланиши ядро изомерининг топилиши билан боғлиқ. Заряд ва масса сони бир хил бўлиб, радиоактив емирилиш механизми ва тезлиги турлича бўлган ядроларнинг мавжудлиги ҳодисаси *ядро изомерияси* деб аталади.

Бироқ, табиий радиоактив изотоплар орасида Pa^{234} изомерияси ягона мисолдир. 1935 йилда И. В. Курчатов, Б. В. Курчатов, Л. В. Мисовский ва Л. И. Русиновлар томонидан Br^{79} ядроси нейтронни қамраганда ҳосил бўладиган Br^{80} радиоактив изомерни олганларидан сўнг ядро изомериясига қизиқиш ва сунъий радиоактив изомерларни чуқур текшириш бошланди. Изомер ядролар одатда ядронинг химиявий белгиси ёнига *m* ҳарфи қўйиб белгиланади, жумладан, метастабил ҳолатдаги бром изомерини Br^{80m} кўринишда ёзилади. Шу ядронинг ўзи асосий ҳолатда Br^{80}.

Табиий бромни нейтронлар оқими билан нурлантирилганда қуйидаги ядро реакцияси бўлади:

$$_{35}Br^{79} + n \rightarrow {}_{35}Br^{80*}$$

Юлдузча билан белгиланган ядро $_{35}Br^{80*}$ қўзғолган ҳолатда бўлади. Агар нейтрон энергияси жуда кам ёки нолга яқин бўлса Br^{80} ядросининг қўзғолиш энергияси нейтроннинг шу ядродаги боғланиш энергиясига тенг бўлади. Қўзғотилган ядроларнинг бир қисми ўзидан гамма-квантлар чиқариб метастабил (пастроқ қўзғолган) ҳолатларга ўтиб олади, қолганлари эса, асосий ҳолатга ўтади. Br^{80} изомерининг ярим яшаш даври 18 *мин*. Шунинг учун ядро реакцияси натижасида олинган Br^{80} ядролари нисбатан қисқа вақтда йўқолиб кетади. Метастабил ядро Br^{80m} (ярим яшаш даври 4,4 соат) гамма-нур чиқариб, Br^{80} изомерига айланади, сўнг 18 минутли ярим яшаш даврида β-емирилиб, Kr^{80} изотопига айланади.

Ҳозир турғун ва радиоактив ядроларнинг икки юз элликдан ортиқ изомери маълум.

Гамма-квантларни нурлатувчи атом ядроларининг қўзғолган ҳолатининг яшаш вақти ядронинг дастлабки (нурлангунча) ва сўнгги ҳолатидаги энергиялар айирмасининг камайиши ва спин айирмасининг ортиши билан ортади. Шунинг учун атом ядросининг изомерияси асосий ва пастки қўзғолган ҳолат спинлари бир-бирларидан жуда катта фарқ қилувчи атом ядроларида тарқалган.

IV боб

ЭЛЕМЕНТЛАР ДАВРИЙ СИСТЕМАСИНИНГ ТЎЛДИРИЛИШИ ВА ТРАНСУРАН ЭЛЕМЕНТЛАР

29-§. МЕНДЕЛЕЕВ ЖАДВАЛИДА ЕТИШМАЙДИГАН ЭЛЕМЕНТЛАР

Менделеевнинг элементлар даврий системасида табиатда бўлиши мумкин деб тахмин қилинган айрим элементларнинг ўрни очиқ қолган. Улар атом номери 43 бўлган технеций ва 61 бўлган прометийдир. Бу элементларнинг табиатда учрамаслиги ўзидан бета, яъни электронлар чиқариш натижасида уларнинг ниҳоят беқарорлигидандир. Аммо бу элементларни бошқа радиоактив элементларнинг изотоплари каби сунъий йўл билан олиш мумкин.

Радиоактив онлалар элементлари орасида ярим яшаш даврлари ниҳоят кичик бўлган —85- ва 87- элемент деярли учрамайди. Шунинг учун бу элементларни ажратиб олиш ниҳоятда оғир иш. Радиоактивлиги билан уларнинг борлигини сезиш мумкин.

Шуни ҳам айтиб ўтиш керакки, U^{235} фақат тасодифий шароитлар туфайлигина сақланиб қолган. U^{235} нинг ярим яшаш даври 0,7 миллиард йил. Демак, Ер пайдо бўлгандан буён ўтган 3 миллиард йил ичида унинг 90% дан кўпроғи радиоактив парчаланиш йўли билан йўқ бўлиб кетган. Қолган қисми эса бир неча ўн йиллар давомида ядро ускуналарни ишлатиб туриш учун етади. Урандан оғирроқ элементлар учрамайди. Планетамиз пайдо бўлган вақтларда трансуран элементлар ҳам етарли миқдорда бўлган. Ҳозир маълум бўлган трансуран элементларнинг энг узоқ яшайдигани Np^{239} дир. Унинг ярим яшаш даври икки миллион йилга тенг. Шунинг учун бу элемент бизнинг давримизгача сақланмаган.

Хўш, бундай беқарор элементлар хусусиятларини қандай қилиб ўрганиш мумкин. Элементларнинг химиявий хусусиятларига радиоактивлик таъсир этмайди. Радиоактив элементларнинг ниҳоят оз миқдордаги концентрациясини ҳам сезиш мумкин. Агар радиоактив элементларнинг бундай хусусияти бўлмаганда, кўпчилик беқарор элементлар кашф қилинмаган бўлар эди. Бу элементларнинг деярли ҳаммаси табиатда учрайди, ёки уларни сунъий йўл билан олиш мумкин.

Мана шундай беқарор, ниҳоятда оз элементларнинг физикавий ва химиявий хусусиятларини ўрганадиган фан *радиохимия* деб аталади.

Технеций элементининг кашф этилиши

Технеций элементи 1937 йилда Италияда Сегре ва Перье томонидан дейтон оқими билан бомбардимон қилинган молибден нишонини текшириш натижасида кашф қилинган. Бу янги элемент даврий жадвалнинг VII группасида бўш қолган 43-катакка жойлаштирилди. Бу элемент кашф қилингандан кейин 10 йил ўтгач Сегре унга технеций номини берди. Технеций грекча «техникос» сўзидан олинган бўлиб, сунъий йўл билан олинган деган маънони англатади. Текширишлар шуни кўрсатадики, 43-элемент изотопи технеций —99 уран ядросининг парчаланишида ҳам ҳосил бўлар экан. Демак, бу элементни ядро реакторининг ҳосилаларидан ажратиб олиш мумкин.

Технеций —99 нинг ярим яшаш даври бир миллион йил. Химиявий хусусиятлари билан эса марганец ва ренийга ўхшаш.

61-элемент

Бу элемент прометий бўлиб, сийрак-ер элементидир. У лантанидлар группасига киради.

Бу группада 14 та элемент бўлиб, улар табиатда жуда кам учрайди. Уларнинг биринчиси атом номери 57 бўлган лантандир. Бу группадаги элементлар бир-бирига ниҳоятда ўхшайди. Улар атомларининг тузилишидаги ўзига хос хусусиятлардан келиб чиқадиган ана шундай ўхшашлик туфайли умумий жадвалдан ташқарига жойлаштирилиб, лантан турган катакка уларнинг элементлар жадвалидаги ўрни белгилаб қўйилади.

Лантанидлар кўпинча бирикма ҳолда учрайди ва ҳатто, уларни химиявий реакциялар ёрдамида ҳам бир-биридан ажратиб бўлмайди. Агар бу элементларни атом номерларига қараб қатор қилиб қўйилса, 61-ўрин бўш қолади. Бу элементни сийрак-ер элементлари орасидан излаш лозим. Лекин сийрак-ер элементларининг химиявий хоссалари бир-бирига яқин бўлганлигидан бунда химиянинг одатдаги усуллари фойда беролмайди. Шу сабабдан 61-элементни «кашф» қилган химиявий ишларнинг деярли ҳаммаси кейин текшириб кўрилганда тасдиқланмади.

Улуғ Ватан уруши йилларидагина Америка Қўшма Штатларидаги яширин Манхеттен проекти деб аталувчи атом бомбаси ясаш Ташкилоти иш ўтказаётган вақтида бу элементнинг борлиги исботланди. Бу элемент уран ядроларининг парчаланиш маҳсули эканлиги 1945 йилда аниқланди. Америка олимлари 61-элементни прометий деб аташди.

Прометийнинг энг узоқ яшовчи изотопи прометий —147 бўлиб, у 3, 7 йил яшайди.

85- элемент

Бу элемент даврий системада бўш қолган ўнинчи катакка жойлаштирилди. Амалда эса 85- элемент прометийдан олдинроқ кашф этилган эди. Агар технеций билан прометийни ўзларининг енгил қўшнилари молибден билан неодим элементини нейтрон ёки дейтон оқимида бомбардимон қилиш орқали олинган бўлса, 85- элементни эса висмут ядросига 2 заряд киритиш, яъни висмут ядросини альфа-зарралар билан бомбардимон қилиш йўли билан олинган.

Бундай синтез Сегре раҳбарлигида Калифорния университетида амалга оширилди. Олимлар бу янги элементни астатин деб аташди. Астатин юнонча сўз бўлиб, беқарор деган маънони билдиради.

Астатиннинг барқарор изотопи бўлмаганлиги сабабли унинг химиявий хоссаларини ўрганиш анча мушкул. Бу элемент изотопларининг ярим яшаш даври бир неча соатдир. Астатиннинг барқарор изотопини олиш усуллари ҳозирча бизга маълум эмас. Циклотрон ёрдамида астатиннинг микроскопик миқдори олинди. Улар илмий тадқиқот ишлари учун ишлатилади.

87- элемент

Бу элемент Менделеев жадвалининг тўртинчи бўш қолган катагини тўлдирган элементдир. Табиатда кам тарқалган бошқа элементлар сингари бу элемент ҳам бир неча бор «кашф» этилган. Лекин бу «кашфиёт» охирига етказилмаган. Баъзан бу элементни виргиний, баъзан эса молдавий деб юритилган. Лекин ҳозирги вақтда бу элементнинг битта ҳам барқарор изотопи йўқ. Энг узоқ яшайдиган изотопининг ярим яшаш даври 20 минутга яқин.

87-элемент оғирроқ элементларнинг емирилиши маҳсулидир. Бу элемент актиноуран ёки уран- 235 дан бошланувчи, радиоактив оилага кирган элементлардан биридир. Аниқланишича, у ишқорий хусусиятларга эга. 1939 йили француз олимаси Мария Перси ниҳоят нозик радиохимиявий усуллар ёрдамида актиний-227 элементини кашф этди. Бу элементнинг яшаш даври 21 минут. Олима ўз ватани шарафига бу элементни франций деб атади.

Франций изотопларидан бири франций-221 дир. Унинг ярим яшаш даври беш минут. Франций ўзида альфа-зарралари чиқариб, астатин изотопига айланади.

Франций торий -233 дан бошланувчи радиоактив оила элементлари орасида ҳам мавжуд. Франций элементининг ярим яшаш даврининг ниҳоят қисқалиги унинг химиявий хусусиятларини ўрганишни оғирлаштиради.

Шундай қилиб, элементлар даврий системасидаги водороддан тортиб, то 92-элемент — урангача бўлган ҳамма катакларининг «эгаси» топилди. Энди навбат урандан сўнг турувчи трансуран элементларга келди.

30 § ТРАНСУРАН ЭЛЕМЕНТЛАР

1939 йилгача фан оламига маълум бўлмаган плутоний элементининг кашф этилиши фан ва техника учун ниҳоятда катта аҳамиятга эга бўлди. Плутонийдан атом бомбасида портловчи манба сифатида, ядро реакторларида эса аста-секин атом энергияси ажратиб турувчи сифатида фойдаланиш мумкин. Плутоний ядро реакторларида камайиш ўрнига миқдор жиҳатидан ортиб боради. Нейтронларни ютиш ва ундан кейинги процессда уран -238 атомининг ядроси плутоний -239 атомнининг ядросига айланади. Шундай қилиб, иссиқлик нейтронлари таъсирида уран -238 парчаланадиган материалларга айланади, реакторда сарф этиладиган ядро ёнилғисининг ўрни маълум даражада шу тариқа тўлдирилади.

Плутонийдан ернинг сунъий йўлдошларини учиришда ҳам фойдаланилади.

Олимлар атом сирларини билиб олдилар. Улар атом тузилишини ўргандилар. Бунинг натижасида фанга маълум бўлган хамма элементларнинг радиоактив изотоплари ҳосил қилинди. Энди олимларни трансуран элементлар, яъни тартиб номери 92 дан ортиқ бўлган элементларнинг мавжудлиги ёки мавжуд эмаслиги масаласи қизиқтира бошлади.

Трансуран элементи билан шуғулланган немис олимлар орасида Ган, Майтнер, Штрассманлар ҳам бор эди. Улар 1936 йилда уран ҳосилалари орасида ярим яшаш даври 23 минут бўлган янги активликни топишди. Аммо улар ураннинг янги изотопи уран - 239 ҳосил бўлди, шекилли, деб ўйлашди:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n' \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma.$$

Албатта, уран -239 бета-нур чиқариб, номери 93 бўлган трансуран элементини ҳосил қилиши керак эди. Афсуски, олимлар буни пайқай олмадилар.

Нептунийнинг кашф этилиши

1940 йилда Мак-Милан ва Абельсон уран-239 нинг бета-емирилиши вақтида ярим яшаш даври 2,3 сутка бўлган яна янги элемент ҳосил бўлишини пайқадилар. Шундай қилиб, ярим яшаш даври 2,3 сутка бўлган янги элемент (атом номери 93, масса сони 239 — биринчи трансуран элемент) уран-239 нинг бета-емирилишидан ҳосил бўлади. Буни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$_{92}U^{239} \xrightarrow[2{,}3\ \text{сутка}]{\beta} {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^{0}.$$

Янги кашф этилган элементни Мак-Милан Қуёш системасида Уран планетасидан кейинги Нептун планетаси номи билан нептуний (ишораси Np) деб атади.

1940 йилнинг охирида нептуний -239 кашф этилди. Нептуний -239 кашф этилгандан бир оз кейинроқ Сиборг, Мак-Милан нептунийнинг яна бир янги изотопини топишди. Тезлатилган дейтрон билан уранни бомбардимон қилганда қуйидаги реакция юз берди:

$$_{92}U^{238} + {}_{1}D^{2} \rightarrow {}_{93}Np^{239} + 2{}_{0}n^{1}.$$

Бу реакциянинг ҳосиласи (нептуний-239) бета-актив бўлиб, унинг ярим яшаш даври 2,3 кундир.

1940 йилнинг охирларида олимлар трансуран элементларини олишда ядро занжир реакциясидан фойдаланиш мумкин эканлигини аниқладилар. Бироқ Иккинчи Жаҳон уруши бошланиб кетгандан кейин трансуран элементлари устида олиб борилган ишлар физиклар томонидан ихтиёрий равишда махфийлаштирилди. 1942 йилда Калифорния университетида Сиборг ва Уолом амалий аҳамиятга эга бўлган нептунийнинг янги изотопи — нептуний -237 ни топдилар. Бу изотопнинг ярим яшаш даври икки миллион йил. Шунинг учун бу элементни ядро реакторларида кўп миқдорда олиш мумкин. Бу элемент мутлақо хавфсиздир.

94-элемент

Мак-Милан раҳбарлигида олимлар нептунийдан кейин плутоний элементини кашф этдилар. Нептуний-239 бета-зарра чиқариш йўли билан емирилиши натижасида атом номери 94 бўлган янги элемент пайдо бўлади. Бироқ янги элементнинг емирилиши ниҳоятда секин ўтади. Шу сабабдан, 1940 йил Сиборг, Мак-Милан ва Кеннеди 94-элементни бошқача йўл билан ихтиро қилдилар. Улар уранни дейтрон билан бомбардимон қилиб нептунийнинг янги изотопини ҳосил қилдилар. Бу изотоп парчаланиши натижасида ҳам плутоний ҳосил бўлади. Аниқланишича, плутонийнинг бу изотопининг масса сони 238. Ярим яшаш даври 90 йил. Нептуний -239 нинг бета парчаланиши натижасида вужудга келадиган плутоний -239 нинг ярим яшаш даври эса 24 000 йил. Плутоний жуда оддий, табиатда кўп тарқалган элементлардан фарқ қилмайди. У кўп валентли ҳисобланади. Валентлиги ўзгариши билан эритмаларининг ранги ҳам ўзгариб боради. Масалан, уч валентли плутоний оксидининг эритмаси тўқ ҳаво рангли бўлади. Эритиш шароитига қараб, тўрт валентли ҳолга ўтиш билан яшил рангни олади. Беш валентли оксидининг эритмаси рангсиз, олти валентлигиники эса оч сариқ ранглидир.

1941 йилда Кеннеди, Сиборг, Сегре уранни бомбардимон қилиш йўли билан плутоний -239 ни олиб, иссиқлик нейтронлари таъсирида унинг парчаланишини исботладилар. Шундан кейин

плутонийни кўпроқ миқдорда олиш учун АҚШ ҳарбийлари қизиқиб қолдилар. 1942 йилнинг сентябрь ойида Чикаго университетида плутоний -239 нинг бир неча миллиграмми олинди. Бу одам қўли билан олинган сунъий элементнинг биринчи кўзга кўринарли миқдори эди.

Ҳозир эса плутонийни килограммлаб олинмоқда. У синтетик элемент.

Плутонийдан сўнг...

Плутоний элементини кўп миқдорда олиш мумкин бўлгандан кейин кўп вақт ўтмасдан 1945 йилда яна иккита трансуран элемент — америций ва кюрий — топилди. Бу элементларга 95- ва 96- номерлар берилди. Сиборг раҳбарлигидаги бир группа олимлар 95- элементдан олдинроқ 96- элементни кашф этди. Кюрий элементи плутонийни альфа-зарралар билан бомбардимон қилиш натижасида олинди:

$$_{94}Pu^{239} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{96}Cm^{242} + {}_{0}n^{1}.$$

Кюрий изотопининг ярим парчаланиш даври 6 ойга яқин. Сиборг группаси кейинроқ 95- элементни кашф қилди. Бунинг учун циклотронда тезлатилган альфа-зарралари билан уран-238 ни бомбардимон қилиб, плутоний-241 олинди. Плутоний-241 эса бета «емирилувчи» бўлиб, ярим яшаш даври 500 йил. Ундан кейин 95-элемент америцийга айланади.

95- элемент Америка шарафига америций, 96- элемент эса радиоактивлик ҳодисасини кашф этган ва чуқур ўрганган Француз олимлари Мария ва Пьер Кюри шарафига кюрий деб аталди.

1950 йили нишон-элементини Берклидаги циклотронда энергияси 35 *Мэв* бўлган альфа-зарралар билан бомбардимон қилиб 97- ва 98- номерли элемент олинди. Бу элементлар мос равишда америций ва кюрий элементлари эди.

Олимлар бу элементларни синтез қилинган шаҳар ва штат шарафига 97- элементни берклий, 98- элементни эса калифорний деб аташди.

Бу иккала элемент ниҳоятда оз миқдорда ҳосил қилинган (калифорнийнинг умумий миқдори 10 000 атомдан ошмайди). Аммо уларни ажратиб олишга ва бу элементларнинг радиоактивлик ҳамда химиявий хоссаларини ўрганишга муваффақ бўлинди. Янги элементларни химиявий жиҳатдан ажратиб олиш махсус синтетик смолаларда хромотографик усул билан олиб борилади.

99- ва 100- элементларнинг кашф этилиши

99- ва 100-элементлар ҳеч кутилмаган тасодифий кашфиётнинг маҳсулидир. Бу элементлар 1952 йили Тинч океанда портлатилган термоядро қуроллари қолдиқларини текшириш нати-

жасида тасодифан топилиб қолди. Бомба портлатилган жойдан олиб келинган бир неча юз килограммли лой орасидан аввал 100-элементнинг 200 дона атоми топилди. Сўнгра Беркли ва Лос-Аламос лабораторияларида ўтказилган текширишлар натижасида олимлар 99- элементни топишга муяссар бўлдилар.

Беркли, Аргон ва Лос-Аламос лабораториялари олимларининг таклифи билан 99- элементга машҳур олим Альберт Эйнштейн хотирасига эйнштейний, 100-элементга эса «атом асрининг отаси» Энрико Ферми хотирасига фермий деб ном берилди.

Бу элементларнинг кашф этилганлиги тўғрисидаги маълумотлар эълон қилингандан кейин бир йил ичида эйнштейнийнинг масса сони 246 дан 256 гача бўлган 11 та изотопи олинди. Улар ичида эйнштейний- 254 бир оз узоқ яшайди (ярим емирилиш даври 270 кун).

Ҳозир фермийнинг масса сони 250 дан 256 гача бўлган 7 та изотопи маълум. Бу изотоплар асосан нейтронларни кетма-кет ютилиши ёки уран ядроларини кўп зарядли ионлар билан бомбардимон қилиб олинган.

Менделеевий ва нобелий элементлари

Сиборг раҳбарлигидаги олимлар эйнштейний элементининг масса сони 253 бўлган изотопи маълум миқдорда (1 миллиард дона атом) тупланганидан сўнг, уни Беркли циклотронидан чиқаётган 48 *Мэв* энергияли альфа-зарралари оқими ёрдамида бомбардимон қилиш йўли билан 101- элементни олишга ҳаракат қилдилар. Ҳар қайси навбатдаги элементни синтез қилиш, одатда, бир-биридан оғир кўчади.

Кашфиётчи олимлар таклифига биноан янги элементни олдинги асрнинг буюк кимёгари, элементлар даврий системасининг асосчиси Д. И. Менделеев шарафига менделеевий деб аталди. 101- элементнинг кашф этилиши инсоният заковатининг ва ҳозирги замон экспериментал техникасининг ғоят буюк ютуғи бўлди. Менделеевий элементининг ярим яшаш даври 30 минут.

Ярим яшаш даври шундай қисқа бўлишига қарамасдан, Сиборг ва унинг сафдошлари менделеевийнинг радиоактивлик ҳамда химиявий хоссаларини аниқлай олдилар.

1957 йилда АҚШ, Англия ва Швеция олимлари 102- элементни синтез қилиш мақсадида Швецияда Нобель номидаги физика институтининг циклотронидан фойдаланмоқчи бўлишди. Уларнинг хабарларига қараганда, 65—100 *Мэв* ли углерод- 13 нинг ядролари билан кюрий-244 ни бомбардимон қилиб, 102- элементнинг масса сони 251 ва 253 бўлган изотоплари олинган. Бу янги элементни олимлар Нобель шарафига ва институт шарафига, нобелий деб аташди. Олимлар нобелий-251 (ёки нобелий-253) нинг ярим яшаш даври 10 минут эканлигини тахмин қилдилар.

Аммо Калифорния университети Радиация лабораторияси ходимлари ўтказган ишлар Стокгольм-Нобель институти олимла-

рининг олган натижаларини тасдиқламадилар Америка олимларининг «Швед олимлари ишида қандайдир хатоликка йўл қўйилган» — деган фикрлари тўғри эканлиги кундан-кунга тасдиқлана боряпти.

1957—1958 йили Москвада Совет олимлари томонидан нобелий элементи устида ўтказилган ишлар АҚШ олимларининг фикри тўғри эканлигини тасдиқлади.

1966 йили Дубна ҳамда Берклида ўтказилган тажрибаларда плутонийни кислород-16 ва кислород-18 ионлари билан бомбардимон қилинганда 102-элементнинг массаси 251 дан 256 гача бўлган изотоплари ҳосил бўлиши аниқланди. Бу изотопларнинг ярим яшаш даври 0,5 секунддан 90 секундгача бўлади.

102-элементнинг номи ҳалигача кўпчилик олимлар томонидан тан олинмаган.

103- элемент — лауренсий ва 104- элемент — курчатовий

Актиноидлар қаторидаги ўн биринчи трансуран элемент, яъни 103- элементни синтез қилиш ишлари 1961 йили Берклидаги оғир ионларни тезлатувчи чизиқли тезлатгичда ўтказилди. 103-элементни ҳосил қилиш учун тезлатилган B^{10} ва B^{11} ионлари билан сунъий олинган калифорний элементидан тайёрланган нишон бомбардимон қилинди. Ҳосил бўлган изотопларнинг ярим яшаш даври альфа активлиги вақт ўтиши билан сунишини кузатиш ёрдамида олиб борилди. Бомбардимон қилиш натижасида ҳосил бўлган кўп хил альфа-актив изотоплар орасида, шу пайтгача олимларга маълум бўлмаган ярим яшаш даври 8 *сек* ва α-зарраларининг энергияси 8,6 *Мэв* бўлган янги изотоп ҳам бор эди. Кейинчалик бу янги синтез қилинган элемент 103- элементнинг масса сони 255 бўлган изотопи эканлиги аниқланди. Кашфиётчилар бу элементга циклотронни яратган ва Берклидаги Радиацион лабораторияга асос солган Лауренс хотирасига лауренсий деб ном бердилар.

Ҳозирги вақтда 103- элементнинг бошқа оғирроқ изотопларини ҳам кўп зарядли ионлар ёрдамида синтез қилиш имконияти катта.

Кейинчалик америкалик олимлар лауренсий-255 ни эмас, балки лауренсийнинг бошқа бир изотопини кашф қилганликларини тан олдилар.

1964 йили Дубнадаги циклотронда социалистик мамлакатларнинг олимлари 104-элементни синтез қилдилар. 104-элементнинг масса сони 260 бўлган изотопи плутоний -242 ни Ne^{22} ионлари билан бомбардимон қилинганда ҳосил бўлди. Олимлар 102-элементнинг масса сони 256 бўлган изотопи хусусиятларини билганлари ҳолда 104^{260} изотопини парчаланишга нисбатан ярим яшаш даври 1 секундга яқинроқ деб кутган эди. Шу сабабдан янги синтез қилинаётган элементни қидириб топиш учун олимлар ниҳоят мукаммал асбоб-ускуналар яратдилар.

Ўтказилган экспериментлар 104- элементнинг масса сони 260 (балки 261) бўлган изотопи синтез қилинганлигидан дарак беради.

1964 йилгача бу элементга ном берилмаган эди. Олимлар 104-элементнинг хусусиятларини мукаммал ўрганиб, унга машҳур Совет олими И. В. Курчатов хотирасига курчатовий деган ном беришди. Ядро физикасининг ривожланишида бу олимнинг хизмати жуда катта.

105-элемент ва ундан сўнг...

1967 йил Ядро тадқиқоти Бирлашган Институтида 105- элементни синтез қилиш устида ишлар олиб борилди. Бу экспериментларда 120 *Мэв* энергияга эга бўлган тезлатилган неон-22 ионлари билан америций -243 ни бомбардимон қилинди. Am^{243} (Ne^{22},4—5n) реакцияси натижасида 105- элементни масса сони 260—261 бўлган иккита изотоп синтез қилинган бўлиши мумкин. Мукаммал ва мураккаб тажрибалар ўтказилиши туфайли реакция натижасида α-зарралари энергияси 9,1—9,8 *Мэв* бўлган янги 105- элементнинг изотопи кашф этилганлиги маълум бўлди. 105- элементнинг изотоплари деб тахмин қилинаётган бу изотопларнинг яшаш даври тахминан 0,01÷0,5 *сек.* 105- элемент изотопларининг хусусиятларини ўрганиш устида олиб борилаётган ишлар ҳозирги замон фанининг энг мукаммал экспериментал усулларини қўллаш билан ҳали ҳам давом этмоқда.

31-§. ЭНГ ОҒИР ЭЛЕМЕНТЛАР

Яна қанча трансуран — табиатда учрайдиган урандан кейинги энг оғир элементларни кашф қилиш мумкин? Бу саволга юқорида кўриб ўтилган трансуран элементларнинг ярим емирилиш даври унинг атом номери ортиб бориши билан кескин камайиб бораётганлигига қараб жавоб бериш мумкин.

Лекин атом номери Z ортиб бориши билан ярим емирилиш даврининг камайиб бориши янги синтез қилинаётган элементларнинг химиявий хусусиятларини аниқлашни жуда ҳам қийинлаштириб қўймоқда. Бундан ташқари, бир қатор изотопларнинг масса сонини аниқлаш ҳам керак бўлади. Фақат баъзи ҳоллардагина бу сонларни масспектроскопия усули билан аниқлаш мумкин. Тажрибаларни мақсадга мувофиқ олиб бориш ва олинаётган натижаларни тўғри талқин этиш учун изотопларнинг яшаш вақтини ва улар чиқараётган зарраларнинг турларн ва энергияларини олдиндан тўғри айта олиш зарур. Бу маълумотлар элементлар даврий системасининг чегараси қаерда ва сунъий йўл билан яна қанча элемент олиш мумкин деган саволларга жавоб беришда катта аҳамият касб этади. Элементларни синтез қилиш чегарасига шундай эришиш мумкинки, бунда сунъий изотопларнинг ярим яшаш даври жуда кичик бўлиб, уларнинг

ядролари эса ўлчаш, ўрганиш мумкин бўлмаган кичик вақт ичида парчаланиб кетади.

Трансуран элементлар изотопларининг ядро хоссаларини билиш, уларни ҳосил қилиш ва текширишда катта аҳамиятга эга бўлади. Албатта, ядродаги нуклонларнинг ўзаро таъсирларининг аниқ назариясига асосланиб, ядроларнинг хусусиятларини олдиндан ҳисоблаб қўйсак яхши бўлар эди. Лекин, бундай назария ҳали йўқ. Ядро моделлари эса маълум бир чегарагача бўлган яқинлашишлардан иборат. Шундай бўлса ҳам, ядро моделлари ва ярим эмпирик усуллар трансуран элементлар изотопларининг хоссалари ҳақида анча маълумот беради. Масалан, α- ва β- емирилиш назарияси емирилиш энергиясига асосланиб ярим емирилиш даври тўғрисида жуда ишончли маълумотларни олиш мумкин.

Элементлар даврий системасидаги барча элементлар каби трансуран элементларининг ядроларида ҳам оғир изотоплардан енгил изотопларга ўтилганда протонларнинг боғланиш энергияси камаяди, нейтронларнинг боғланиш энергияси эса ошади. N нинг камайиши ёки ошиши билан нейтрони етишмайдиган (нейтронодефицит) изотопларнинг ядроларида протонларнинг боғланиш энергияси, нейтронлари ортиқча бўлган изотопларнинг ядроларида эса нейтронларнинг боғланиш энергияси манфий бўлиб қолиши керак. Ортиқча протон ёки нейтрон ядродан отилиб чиқишидан анча олдин уларнинг ўзаро β-емирилиш билан бирбирига алмашинуви энергия жиҳатдан қулай экан. Нейтрони ортиқча изотоп электрон β^- - емирилиш, нейтрони етишмайдиган изотоп — позитронли (β^+) - емирилиш ёки электронни ютишга мойил экан. Оғир β^- - актив ва енгил β^+ - актив ёки электрон ютувчи изотоплар орасида шу элементнинг радиоактив бўлмаган энг турғун изотоплари жойлашади.

Оғир элементлар учун яна шу характерлики, агар икки протон ва икки нейтроннинг боғланиш энергиялари йиғиндиси 28 *Мэв* (уларнинг гелий ядросидаги қўшилиш энергияси)дан кичик бўлса, ҳатто протонлар ва нейтронлар боғланиш энергиялари мусбат бўлган ҳолда ҳам бу ядролар α-емирилишига нисбатан турғун бўлмайди. α-зарраларнинг боғланиш энергияси нейтрони етишмайдиган изотопларга ўтган сари, яъни N камайиши билан камая боради. Лекин бу ҳолда енгил ядроларда нейтронларнинг боғланиш энергияси жуда тез ортади, натижада якка протонларга ёки Z жуфт бўлган ҳолларда эса протон жуфтларига нисбатан турғунсизлик ҳосил бўлганига қадар α- зарраларнинг боғланиш энергияси мусбат бўлиб қолади.

Даврий системанинг ўртасида жойлашган элементлар ядроларида бир нуклонга тўғри келган ўртача боғланиш энергияси 1 *Мэв* га кам бўлган оғир ядроларда шароит бошқачароқ. Протон ва нейтронларнинг боғланиш энергияси манфий бўлишдан анча аввал бу энергия гелий ядросидагидан анча кичик бўлиб

қолади, натижада энергия жиҳатидан α-емирилиш мумкин бўлиб қолади. N нинг камайишида нейтронлар боғланиш энергиясининг ўсишига нисбатан протонларнинг боғланиш энергияси тезроқ камаяди, натижада ядроларнинг α-емирилишга нисбатан турғунмаслиги ошади. Нейтронлар сони жуда ҳам кўп бўлган ҳолда протонларнинг боғланиш энергияси тўсатдан ошиб кетиши натижасида оғир ядроларнинг α-турғунлиги ҳосил бўлади. Ҳисоблар шуни кўрсатдики, U^{254} дан бошлаб уран изотоплари учун α-зарраларнинг боғланиш энергияси мусбат бўлади. Ҳозир тажрибада кўринмаган маълум ҳолларни ҳисобга олмасак, висмутдан бошлаб оғир элементларнинг ҳамма изотоплари α-емирилишга нисбатан тургунмас ҳисобланади.

Агар α-емирилиш энергияси потенциал тўсиқ (барьер) баландлигидан анча кичик бўлса, емирилиш жуда секин ўтади ва натижада бошқа емирилишлар бўлмаган ҳолда ҳам уни кузатиш мумкин бўлмайди. Масалан, шундай изотоплардан бири α-емирилишга нисбатан яшаш вақти 10^{18} йил бўлган Bi^{209} дир. Агар α-емирилиш билан бир вақтда β^- ёки β^+-емирилиш бўлса, у ҳолда α-емирилиш кўринмайди, чунки ядро α-емирилишга нисбатан бўлган яшаш вақтини ўтказгунга қадар у бошқа йўллар билан емирилиб кетади. Шундай қилиб α-емирилиш эҳтимоллиги радиоактив парчаланишда анча кичик бўлади.

Тажрибада α-емирилиш бўладиган изотоплар албатта β-турғун ёки спонтан бўлинишга нисбатан абсолют турғун бўлиши шарт эмас. Улар учун фақат α-зарраларни чиқаришдан ташқари барча емирилишлар имконияти жуда кичик бўлади, холос.

β-турғунлик билан чегарадош бўлиб жойлашган нейтрони кам изотопларда электрон ютиш α-емирилиш билан сезиларли даражада рақобат қилади, лекин нейтронлар сони камая бориши билан (α-емирилишнинг ҳам, электрон ютишнинг ҳам энергияси оша бориши билан) α-емирилиш устунлик қила бошлайди, чунки унинг тезлиги энергия ортиши билан жуда тез ортади. Электрон ютиш ҳам, β-емирилиш ҳам янги топиладиган элементни ва изотоплар сонини чеклаб қўя олмайди, чунки бу процессларнинг давом этиши нисбатан анча катта. Ҳатто протон чиқаришга нисбатан турғунлик чегарасида ҳам, яъни нейтронлар жуда ҳам етишмаган ҳолатда ҳам изотопларнинг электрон ютишга нисбатан яшаш вақти секунд ёки секуднинг маълум бир қисмига тенг бўлар экан. β^-- емирилиш рўй берадиган ядроларда нейтронлар анча ортиқ бўлган ҳолда ярим емирилиш даври миллисекундларда бўлади. Бу вақтни ўлчаш мумкин, ундан ташқари β^--емирилиш атом номерининг ортишига олиб келади, ана шунинг учун у Z га эга бўлган янги элемент очилишига халақит бериши мумкин эмас.

α-емирилишда эса иш бошқача бўлади. У янги олинадиган элемент ва изотоплар даврасини чегаралаб қўйиши мумкин. α-емирилишга нисбатан ядроларнинг яшаш вақти α-зарралар энергиясининг ошиши билан ядро вақтларига қадар (10^{-21}—10^{-22} *сек*) камайиши мумкин. Лекин тажрибадан кўринадики, бундай кичик вақтлар чегарасига қадар анча вақт бор. α-емирилиш тезлиги анча секин ўтиши билан характерланадиган 108-элементга қадар бўлган кўп сонли изотоплар борки, улар бошқа чекланишлар бўлмагани ҳолда олиниши мумкин.

Ҳозирги замон фани нуқтаи назаридан, Менделеев даврий системасидаги элементлар сонини чегаралаб қўювчи энг «хавфли» емирилиш бу ядроларнинг спонтан бўлинишидир. Илгари айтиб ўтилганидек спонтан бўлинишнинг асосий хусусиятлари сифат жиҳатидан аниқ бўлса ҳам, лекин ҳозирга қадар бу ҳодисанинг миқдорий назарияси аниқланмаган.

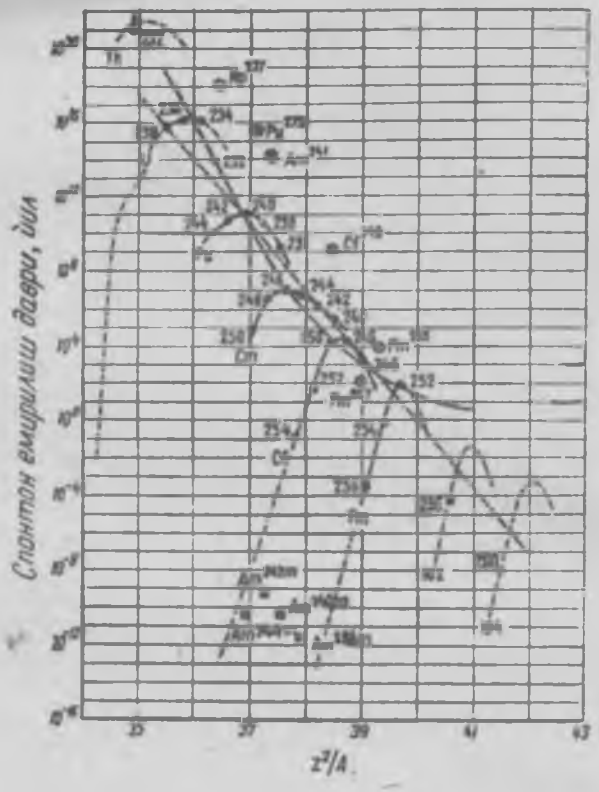
Оғир трансуран элементларнинг спонтан бўлиниш даврлари ўзгаришини билиш учун аввало бир изотопдан иккинчисига ўтганда бўлиниш тўсиғи ўзини қандай тутишини билиш керак. Бу тўсиқни аниқ ҳисоблаш жуда қийин, шунинг учун янги ва энди кашф этиладиган элементларнинг турғунлигини баҳолаш тажриба маълумотларига асосланган.

Трансуран элементлар ядроларининг спонтан бўлинишини текширишда олинган биринчи маълумотлар қуйидаги оддий ярим эмпирик муносабат билан ифодаланади:

$$\lg T_{1/2} = M - N\frac{Z^2}{A},$$

Агар ярим емирилиш даври $T_{1/2}$ — секунд ҳисобида ифодаланса, $M \approx 157$ ва $N = 3{,}75$. Ярим емирилиш даврининг бўлиниш параметри Z^2/A билан бўлган боғланиши 20-расмда штрих-пунктирли чизиқ билан ифодаланган (туташ чизиқ секин бўлинувчи изотоплар учун берилган нуқталарни бир-бири билан боғлайди).

Кейинги ўлчашлар кутилмаган натижаларга олиб келди. Агар уран, плутоний, кюрийнинг енгил изотоплари учун A ортиши билан уларнинг спонтан бўлиниш қобилияти камая борса (яъни кутилганидек яшаш вақти ортса), кейинги масса сонининг орта бориши билан спонтан бўлинишнинг ярим емирилиш даври ҳам камая бошлайди. Бундай кескин ўзгариш калифорний ва фермий учун яққол кўринади: Cf^{250} дан Cf^{254} га ўтганда ярим емирилиш даври 100 минг марта, Fm^{252} дан Fm^{256} га ўтганда 500 минг марта камаяди. Аслида эса, улар тахминан 100 марта ортиши керак эди. Спонтан бўлинишга нисбатан ярим емирилиш даври α-емирилиш энергиясининг ошишига параллел равишда тўсатдан камайиб кетади. Спонтан бўлинишнинг бундай тезлашиб кетиши деформацияланган ядролардаги нуклон жуфтлари жойлашган сатҳлар ўртасида энергетик ўтишлар билан боғлиқдир. Ядро деформацияланганда нуклон жуфтлари пастроқ сатҳ-



20-расм. Емирилиш даврининг тартиб номери (t) га боғлиқлиги.

га ўта олса, у ҳолда бу ўтиш энергияси ядрони бўлинишга олиб келадиган унинг коллектив (бутун) уйғонишга айланади.

Шундай қилиб, ҳозиргина юқорида кўрилган тоқ сонли нуклонларга эга бўлган ядро учун кўрилган ҳодисага тескари ҳодиса намойиш этилади. У ерда коллектив уйғониш айрим нуклонлар энергиясини ошириш (уларнинг бутун ядро билан бўлган богланишини камайтириш)га олиб келади, шунинг учун бўлиниш қийинлашади. Бу ерда эса $N = 152$ атрофидаги жуфт-жуфт ядроларда ядро деформацияси «ташқи» нуклонлар жуфти билан барча ядро ўртасидаги боғланишни жипслаштиради. Бу жуфтлар гўё ядро потенциал чуқурлигида пастга тушади, бунда ажралиб чиқаётган энергия эса бўлинишга ёрдам беради. Бу тўғрида гапириш осон бўлса ҳам, уни миқдорий ҳисоблаш анча қийин. Шунинг учун узоқ вақт давомида, томчи моделида айтилганига тескари равишда A нинг ортиши билан мазкур элемент изотопларининг ярим емирилиш даври камайиши ва баъзи ҳолларда бир хил A га эга бўлган изобарларнинг Z ортиши билан спонтан бўлиниш

тезлиги камайиши (масалан, Cf^{252} дан Fm^{253} га ва Cf^{254} дан Fm^{254} га ўтишда) каби ҳодисалар рўй берадиган бўлинишнинг аномал соҳаси яна қанча чўзилиши мумкинлиги аниқ эмас эди. Хусусан бу кўрсатилган ҳодиса жуда қизиқ эди. Чунки, бўлиниш асосан протонларнинг электростатик итарилишларига тааллуқлидир, бу ерда эса оғир ядроларни «жипслаштирувчи» нейтронлар билан протонларни алмаштириш натижасида улар сонининг камайиши бўлинишни кучайтиришга олиб келмоқда. Шундай қилиб, $N=152$ дан кейин келадиган нейтронлари ортиқча бўлган янги изотопларнинг спонтан бўлиниш тезлигини экстраполяция қилиш йўлларини топиш имкони туғилди.

Тажрибадан кўринадики, $N=152$ атрофидаги α-емирилиш энергиясининг ортиши шу соҳанинг ўзига тегишли эффектдир, чунки $N=156$ дан бошлаб бу энергия яна камая боради. Демак, ярим емирилиш даври орта боради. Табиийки, $N=152$ атрофида ядроларнинг бўлина олиш қобилиятларининг ўсиши ҳам тез ўтадиган ҳодиса деб қаралиши мумкин. Лекин олимлар узоқ вақт давомида спонтан бўлиниш ёки нейтрони ортиқча изотопларнинг ярим емирилиш даврларини экстраполяция қилишда бу шароитни ҳисобга олмадилар. Оддий экстраполяцияга тескари бўлган тажриба далиллари ҳам бор. Бу далиллар нейтронлари ортиқча бўлган изотопларнинг спонтан бўлинишга нисбатан бўлган ярим емирилиш даврлари анча катта қийматларга эга эканлигини кўрсатди. Биз бу ерда термоядро портлашида хосил бўладиган трансплутоний элементлари (Es^{253} ва Fm^{255} каби изотоплар)ни олишни назарда тутмоқдамиз. Фермийнинг Fm^{255} изотопи ҳосил бўлиши учун уран ядроси 17 нейтрон ютиши керак ва ундан кейин саккиз марта β^--емирилиш юз бериши керак. Агар спонтан бўлиниш тезлиги β-емирилиш тезлигидан анча катта бўлса, U^{235} дан Fm^{255} гача бўлган «йўл» текис босиб ўтилмайди, яъни йўлда бўлиниш ҳосил бўлади. Айтиб ўтилганидек, β-емирилиш тезлиги нисбатан кичик: U^{255} нинг Np^{255} га айланиш вақти, 0,1 *сек* дан кичик бўлмаса керак, β-емирилишнинг кейинги босқичлари эса яна ҳам катта вақт талаб қилади. Оддий экстраполяцияга асосланган спонтан бўлиниш ярим даврларининг тахминий қиймати эса U^{255} учун 10^{-26} *сек*, Np^{255} учун 10^{-17} *сек*. Шундай қилиб, спонтан бўлинишнинг бундай катта тезлик билан ўтишидан портлаш вақтида Fm^{255} ни олиш тўғрисида гап бўлиши ҳам мумкин эмас. Демак, бўлиниш $A=250$ дан бошлаб оғир изотопларни олишга халақит берган бўларди.

Экстраполяция қилишнинг камчилик томонлари жуда кўп, лекин шунга қарамасдан ҳисоблашнинг бошқа йўллари бўлмаганлиги туфайли янги изотопларнинг ядро хоссаларини фақат шунга асосланиб айтиб бериш мумкин. Агар тажриба натижаларига назар ташласак, нептунийдан фермийгача бўлган элементларнинг энг узоқ яшовчи изотоплари асосан β-турғунлик соҳаси ва унинг чегарасида жойлашган. Кейинги элементлар изотопла-

Фермийдан сўнгги 108- элементгача бўлган барқарор изотоплар

Изотоп	Ярим яшаш даври			Умумий ярим яшаш даври
	α	β	Бўлинишга нисбатан	
Fm^{257}	2 йил	—	65 йил	2 йил
Fm^{258}	100 кун	—	5 соат	5 соат
Fm^{259}	20 йил	10 соат	50 кун	10 соат
Fm^{260}	10 йил	—	20 минут	20 мин.
Fm^{261}	900 йил	1 соат	200 кун	1 соат
Fm^{262}	500 йил	15 соат	1 соат	1 соат
Fm^{263}	5×10^4 йил	7 минут	—	7 минут
Fm^{264}	3×10^4 йил	50 минут	1 соат	30 минут
Md^{257}	3 кун	4,5 кун	20 йил	2 кун
Md^{258}	30 кун	20 соат	$2{,}5\cdot10^5$	20 соат
Md^{259}	80 кун	—	40 кун	30 кун
Md^{260}	2,5 йил	10 соат	$8\cdot10^3$ йил	10 соат
Md^{261}	6,5 йил	4 кун	4 кун	2 кун
Md^{262}	80 йил	2 соат	10^6 кун	2 соат
102^{261}	15 соат	—	6 кун	10 соат
102^{262}	5 соат	—	1 мин.	1 минут
102^{263}	10 кун	50 кун	20 соат	20 соат
102^{264}	5 кун	—	1 минут	1 минут
102^{265}	300 кун	5 соат	35 кун	5 соат
102^{266}	150 кун	70 йил	40 минут	40 минут
Lr^{263}	5 соат	—	10 кун	6 соат
Lr^{264}	2 кун	2 кун	6×10^6 йил	20 соат
Lr^{265}	4 кун	—	10 кун	2 кун
Lr^{266}	5 кун	10 соат	$1{,}5\times10^5$ йил	10 соат
Lr^{267}	100 кун	2 кун	3 кун	1 кун
Ku^{267}	5 соат	—	20 соат	4 соат
Ku^{268}	2 соат	—	3 минут	3 минут
Ku^{269}	7 кун	—	2 йил	7 кун
Ku^{270}	2 кун	—	5 кун	1 кун
Ku^{271}	3 йил	1 соат	200 кун	1 соат
Ku^{272}	4 йил	—	300 йил	4 йил
105^{270}	4 соат	1 кун	1×10^6 йил	3 соат
105^{271}	10 соат	—	300 кун	10 соат
105^{272}	10 кун	10 соат	$1{,}5\times10^9$ йил	10 соат
105^{273}	100 кун	1 кун	$8{,}5\times10^4$ йил	1 кун
106^{273}	7 соат	—	1×10^3 йил	7 соат
106^{274}	6 соат	—	90 йил	6 соат
106^{275}	40 кун	7 кун	6×10^4 йил	6 кун
106^{276}	60 кун	—	6×10^6 йил	60 кун
107^{276}	20 соат	20 соат	—	10 соат
107^{277}	5 кун	—	—	5 кун
108^{279}	2 кун	—	2 кун	2 кун
108^{280}	3 кун	—	3 кун	3 кун
108^{281}	1 йил	1 йил	1 йил	1 йил
108^{282}	2 йил	1 йил	2 йил	1 йил

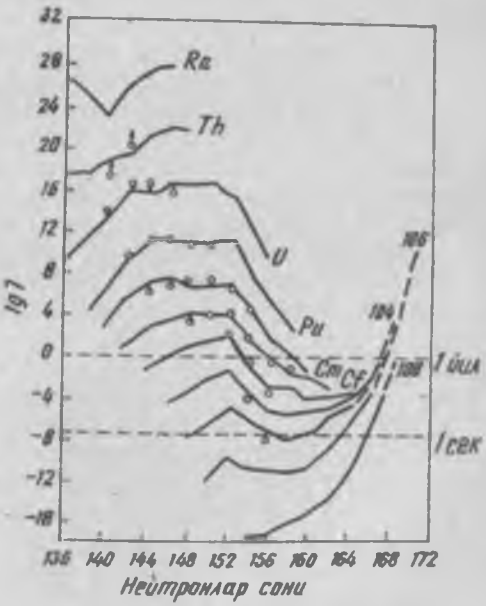
ри учун ҳам шундай жойланишни кутиш мумкин. Лекин нейтронлари ортиқча изотоплар ядросининг спонтан бўлинишларининг жуда катта тезликлари шундай хулосага олиб келадики, 104, 106 ва бошқа шу каби турғун бўлган тоқ изотоплар β- турғунлик соҳасидан нейтрон етишмайдиган томонга сурилиши керак.

1962 йилда швед физиги Юханссон ядронинг бўлиниш тўсиғига бир нуклонли ҳолатларнинг таъсирини ҳисобга олувчи ўзи яратган моделига асосланиб, нейтронлар сони N = 152 ёки ундан катта бўлган трансуран элементлар изотопларининг спонтан бўлиниши даврларини баҳолашга уриниб кўрди. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, N = 152 бўлган нейтрон қобиқ ости эффекти шунинг ўзига хос характерга эга бўлиб, нейтронлар сони 156—160 дан ортиқ бўлган изотоплар учун йўқолиб кетади. Юханссоннинг кўрсатишича, бу изотоплар учун спонтан бўлиниш даври масса ортиши билан яна кўпайиши керак.

Бундай ҳисобларни миқдорий жиҳатдан тахминий деб қарасак бўлади. Чунки Дубнада олинган 102^{256} ва 104^{260} изотопларининг спонтан бўлиниш даври ҳисобланганидан 10^4—10^5 марта катта бўлиб чиқди. Умуман айтганда, N = 152 бўлган ядролар қобиқ эффектига эга бўлади деб айтиш тўғри. Лекин ҳозир мавжуд бўлган далилларга асосланиб, оғир изотопларининг спонтан бўлиниш даври қаерда ўса бошлашини айтиб бериш қийин.

Бир қанча тажрибаларда Fm^{258} изотопини синтез қилишга ҳаракат қилинган бўлса-да, улар натижа бермади. Тахмин қилинишича, Fm^{258} нинг спонтан бўлиниш даври кичик. Агар шундай бўлса, у ҳолда N = 156 дан N = 158 га ўтишда фермий изотопининг турғунлиги камая борар экан.

Яқинда Америка олимлари Вайола ва Уилкинс Святецкийларнинг қобиқ эффектларни ҳисобга олувчи янгиланган ярим эмпирик масса тенгламасига асосланиб, трансуран элементлар изотопларининг бўлиниш тўсиғини анчагина тўғри баҳолашди. Бу ҳисоблашларга асосланиб, Вайола ва Сиборг атом номери 102 дан катта бўлган



21-расм. Спонтан бўлиниш даврларининг ўзгариши.

элементлар учун спонтан бўлиниш даврларини баҳоладилар. 4-жадвалда фермийдан 108-элементгача бўлган элементларнинг изотопларини шундай баҳолашларн келтирилган. 21-расмда эса, изотопларнинг спонтан бўлиниш даврларининг ўзгаришлари кўрсатилган.

Совет физиги В. М. Струтинский қобиқ эффектининг таъсирини бошқача ва тўғрироқ шаклда ҳисобга олди. Унинг ҳисоблашларига кўра, бўлиниш тўсиғи ва унга боғлиқ ўлароқ спонтан бўлинишнинг имконияти Z^2/A параметрининг ошишида олдинги кутилганига нисбатан анча секин камаяр экан.

Тажрибадан олинган сонлар 100—104 каби оғир элементлар изотопларининг турғунлиги ортиши тўғрисида хулоса чиқаришга имкон бермайди.

Агар тажриба натижалари ва ҳисоблаш сонларига асосланиб янги изотоп ёки янги элементни синтез қилиш имкони тўғрисида гапирмоқчи бўлсак, бу соҳада ҳозирги шароит олдинги шароитга нисбатан анча қулай деган хулосага келамиз.

Атом номери 109 гача бўлган элементлар изотоплари уларнинг ядро хоссаларини ва маълум бир ҳолатларда уларнинг химиявий хоссаларини ўрганиш учун керак бўлган даражада турғундир. Бундан ташқари, атом номери 104 дан катта бўлган янги элементларни синтез қилиш билан бир қаторда, 101—104-элементларнинг оғирроқ ва турғунроқ изотопларини ҳам синтез қилиш мумкин.

Спонтан бўлинишга нисбатан яшаш вақти катта бўлиши мумкин бўлган тоқ сонли нуклонлардан иборат изотопларни синтез қилиш трансуран моддаларни ўрганишда катта аҳамиятга эга.

Энг оғир моддалар изомерларини синтез қилишга бағишланган ишлар диққатга анча сазовордир. Юқорида айтиб ўтилган текширишлар спонтан бўлинишининг тўсатдан катта имкониятга эга бўлган изомерларининг очилишига олиб келди. Аксинча, спонтан бўлиниши қийин бўлган изомерлар ҳам бўлиши мумкин.

Кейинги вақтларда атом номери $Z=126$ ва нейтронлар сони $N=184$ бўлган икки марта сеҳрли ядро атрофида жойлашган ядроларнинг янги турғун соҳаси бор деган фикр туғилди ва у тез ривожланмоқда. Протонли ёки нейтронли қобиқлар мавжудлиги тўғрисидаги савол очиқ қолади, лекин ана шундай қобиқлар бўлса, у ҳолда ядролар улар атрофида сферик шаклга эга бўлади, бўлиниш тўсиғи эса бир қанча *Мэв* ларда баҳоланади. Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, протонли ёпиқ қобиқ $Z=126$ дагина эмас, балки $Z=114$ даёқ пайдо бўлиши мумкин. Бу ҳолда 114^{298}нинг ўзи икки марта сеҳрли изотоп бўла олади. Ҳисоблашлардан маълум бўлдики, $Z=114$ элемент изотопларининг бутун бир соҳаси бўлиб, улар сферик шаклга эга ва улардаги бўлиниш тўсиғи бир неча *Мэв* га тенг.

Бизга маълум бўлган $N=184$ даги нейтронли ёпиқ қобиқ билан бир қаторда нейтронлар сони камроқ бўлган ($N=164$ ёки

168) нейтрон қобиғи ҳам ҳосил бўлиши мумкин. Агар бу тахмин тўғри бўлса, 114^{282} ядроси етарли даражада тургун бўлади. Бу эса, турғун бўлмаган $Z=108—112$ ли ядролар соҳасидан ўтгандан кейин яна α- ва β-парчаланишга ва спонтан бўлинишга нисбатан яшаш вақтлари етарлича катта бўлган ядролар соҳаси мавжуд деган маънони билдиради.

1968 йилнинг июнида таниқли инглиз олими Пауэлга СССР Фанлар академиясида М. В. Ломоносов мукофотини топшириш вақтида у қуйидагиларни баён этди: «Ер атмосферасидан ташқарида ядроли фотоэмульсияни космик нурлари билан нурлантирилганда қизиқарли бир из топилган. Номаълум атом ядроси эмульсиядан ўтаётган кучли ионлаштиришни ҳосил қилган, натижада катта йўғонликда из ҳосил бўлган. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, бундай йўғон изни фақат атом номери 106 атрофида бўлган атом ядроси қолдириши мумкин. Балки бу янги нисбатан турғун бўлган моддалар соҳаси мавжудлигини кўрсатувчи дастлабки тажриба далилидир. Ишончимиз комилки, бу далил эътиборни ўзига жалб қилади ва чиқарган хулосанинг тўғрилигини тасдиқловчи ёки бошқача тушунтириш берувчи янги тажрибалар ўтказишга ундайди».

$Z=114$ ёки $Z=126$ бўлган тургунроқ трансуран элементларнинг янги соҳаси тўғрисидаги масала анча қизиқдир, лекин бу билан жуда оғир элементларнинг мавжудлиги тўғрисидаги гап тамом бўлмайди.

В. Святецкийнинг кейинги ҳисоблари шуни кўрсатадики, массаси 1 тонна бўлган «макроядролар» бўлиши мумкин. Бу ядроларнинг радиуси 10^{-3} *см* бўлиши мумкин. Бундай ядролар тўғрисидаги мулоҳазалар, атом ядроларида ҳаракатланувчи ядро ва электростатик кучлардан ташқари гравитация кучларини ҳам назарга олиб қилинган ҳисоблашларга асосланган. Бунда гравитация кучлари ядро массаси жуда катта бўлгандагина таъсир қилади. Бундай ядронинг ўзига хос хусусиятларидан бири электр зарядининг массага нисбатининг жуда кичиклигидадир (тахминан 10^{-18}). Шундай хусусиятларга эга бўлган макроядро нейтрон материясининг томчиси бўлиб, унинг юзида маълум бир миқдорда (~ 1012) протонлар жойлашган бўлади. Бундай ядроларни тузиш ва уларнинг мавжудлиги ҳақидаги масала очиқ қолган.

Янги трансуран элементлар изотопларини синтез қилишнинг умумий келажагини кўриб шуни айтиш мумкинки, синтез қилиш усулларини мукаммаллаштириш ва изотопларнинг емирилишини кузатиш нейтрони етишмайдиган ва нейтрони ортиқча ядроларни ўрганишни чуқурлаштиради ва кенгайтиради. Бу соҳанинг чегараси изотопларнинг нуклонлар чиқаришга нисбатан турғунлиги чегараси билан аниқланади.

Юқорида айтиб ўтилганидек, β-емирилиш ва электрон ютиш — секин ўтадиган ҳодисалардир, шунинг учун улар элементлар сонини чегаралай олмайди. β-емирилиш учун тўғри келишига

шу нарса сабаб бўла оладики, β-емирилишда ядронинг заряди ортади. Янги элементларни аниқлашда, β-емирилишдаги хавфли сирли нарса шундан иборатки, β-емирилишда Z^2/A нисбат ортади, ортиқча нейтронлар сони эса камаяди. Демак, кўп босқичга эга бўлган β-емирилиш занжирининг ҳосили α-зарядлар чиқариш ёки спонтан бўлиниш йўллари билан тез орада парчаланиб кетиши мумкин.

Электрон ютишда эса аҳвол бошқача бўлади. Нуқта шаклидаги ядрога эга бўлган кўп электронли атом учун қилинган ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, $Z>137$ бўлган элемент умуман яшай олмайди. Чунки ядронинг заряди ундан ҳам орта борса, электронлар энди ядрога энг яқин бўлган K-қобиқни ҳосил қилмасдан, балки улар ядронинг ичига «йиқилиб» туша бошлайдилар ва зарядни 137 га қадар камайтиради. Ҳақиқатда эса, атом ядроси нуқта шаклида эмас, бу эса ўз навбатида шароитни ўзгартириб юборади. Натижада электроннн ютиш $Z>137$ бўлган ядроларнинг мавжудлиги учун халақит беролмайди. Ҳатто жуда оғир элементларнинг бу соҳасида ҳам изотопларнинг яшаш вақтини чегаралашда асосий вазифани α-емирилиш ва спонтан бўлиниш бажаради. Бундан бир неча йил илгари Америка назариётчиси Унлер Z ва A нинг катта бнр соҳаси учун атом ядроси массасининг ярим эмпирик формуласига асосланиб узоқ чўзилган экстрополяцияга асосан яшаш вақти 10^{-4} *сек* дан катта бўлган ядролар $Z\sim150$ ва $A\sim500$ гача, Z ва A нинг катта оралигида мавжуд бўлиши мумкин. Атом ядроларининг турғунлик чегарасини аниқлашда Я. Б. Зельдович томонидан қўйилган, нейтрон суюқлиги, яъни фақат нейтронлардан иборат бўлган ядро мавжудми, деган савол жуда катта аҳамиятга эга. Бундай суюқлик молекулалари, оддий зарралар вазифасини спини нолга тенг бўлган нейтронлар жуфти — динейтронлар ёки тўртта нейтрон — тетранейтронлар бажариши мумкин. Динейтронларни қидириш йўлидаги кўп йилги изланишлар ҳозирча бирор натижа бергани йўқ.

Шундай қилиб, ҳатто динейтронлар ва тетранейтронларнинг йўқлиги ҳам нейтронлар суюқлиги мавжудми, йўқми деган саволга жавоб бера олмайди. Энг кичик тарангликка эга бўлган нейтронлар ядросининг мавжуд бўлиши учун керак бўлган нейтрон томчисининг маълум бир критик ўлчами бўлиши керак. Ҳисоблашлар ҳозиргача нейтрон суюқлигининг мавжудлиги тўғрисида маълум бир хулосаларга олиб келганича йўқ, шунинг учун бу масала очиқлигича қолмоқда. Агар нейтронли ядро мавжуд бўлса, унинг зичлиги оддий ядролар зичлигига қараганда 1000 марта кичик бўлиши керак, яъни N нейтрондан иборат нейтрон ядросининг радиуси одатдаги N сонли протон — нейтрондан иборат ядронинг радиусидан бир неча марта катта бўлади.

Нейтрон ядро мавжудлиги ядроларнинг нуклонлар чиқаришга нисбатан турғунлнги чегарасининг нккн варнантига олиб ке-

лади. Нейтронли ядролар соҳаси ёки ҳозирги маълум бўлган ядролар билан қўшилиб кетарди, ёки даврий системадаги энг енгил элементларнинг жуда ғалати ўта оғир изотоплари «оролчаси»ни ҳосил қилган бўларди.

Шундай изотоплар ёки нейтрон суюқликларининг мавжудлиги тўғрисидаги масала ҳозирги замон ядро физикасининг энг қизиқарли муаммоларидан биридир. Соф нейтронли ядроларни сунъий йўл билан ҳосил қилиш учун эса баъзи бир юлдузлардагина олиниши мумкин бўлган нейтронларнинг катта оқимлари керак бўлади. Шунинг учун нейтронлар билан тўлдирилган ядролар мавжудлиги масаласи биринчи навбатда назарий физика ва астрофизиканинг ишидир. Ерда олиниши мумкин бўлган шароитга асосан эса фақат кичик давра ичидаги янги изотоплар ва элементлар тўғрисида гапириш мумкин.

V боб

ҲОЗИРГИ ЗАМОН ТЕЗЛАТГИЧЛАРИ

32-§. ТЕЗЛАТГИЧЛАРНИНГ ХИЗМАТИ

Ядро ва атом физикасининг қисқа ва лекин унумли ривожланиш тарихида зарядли зарраларни тезлатгичларнинг хизмати жуда каттадир. Ядро физикасининг мустақил фан сифатида ривожланиши зарядли зарраларни тезлатгичларнинг кашф қилинишини тақозо қилди.

Тезлатгичлардан фойдаланишнинг илк натижалари ядро реакцияларини ўрганишда муҳим ускуна ва омил пайдо бўлганини кўрсатди, ядро физикаси бўйича бажариладиган илмий-тадқиқот ишларида муҳим силжиш ясади. Маълумки, инглиз олими Э. Резерфорд ўзининг биринчи ядро реакциясини табиий радиоактив элемент (полоний-210) дан чиқаётган α-зарралар билан бажарган эди. Резерфорд тажрибасига кўра, ядро реакциясини фақат радиоактив элементлардан чиқаётган зарралар ёрдамида кенг кўламда олиб бориш мумкинми? Бу саволга дастлабки тадқиқотлар салбий жавоб берди. Биринчидан, табиий радиоактив элементлардан чиқаётган альфа-зарраларнинг энергияси катта эмас. Тезлиги энг катта бўлган альфа-зарраларнинг энергияси 10 *Мэв* дан ошмайди. Иккинчидан, табиий радиоактив элементлардан чиқадиган α-зарралар миқдори ядро реакциясини кенг кўламда кузатиш учун етарли бўлмайди. Ядронинг кўндаланг кесими жуда кичик (тахминан 10^{-24} *см*^{2}) бўлганлиги сабабли, альфа-зарранинг ядрога тушиш эҳтимоллиги жуда оз бўлади. Тажриба ва ҳисоблар шуни кўрсатадики, ядро томон йўналтирилган бир миллионта заррадан фақат биттасигина ядрога тушиб реакция беради. Бундай реакцияларни кузатиш жуда оғир бўлиши билан бир қаторда, реакция натижасида ядронинг ички тузилиши ҳақида олинадиган хилма-хил маълумотларни йиғиш учун ҳаддан ташқари кўп вақт сарф бўлади.

Демак, ҳар бир қўйилган қадамнинг табиий давоми бўлганидек, ядро реакциясини кузатиш йўли билан ядронинг ички тузилиш қонунларини ўрганиш ҳам давом этмоғи лозим. Шунинг учун ҳам катта интенсивликка ва юқори энергияга эга бўлган снаряд — зарралар манбаини топиш навбатдаги вазифа бўлиб қолди.

Маълумки, зарядли зарралар икки электрод орасидаги электр майдонидан ўта туриб, шу майдон кучланганлиги миқдорига мос равишда тезланиш ва энергия олади. Масалан, протон 10 *в* кучланишли майдондан ўтса, 10 *эв*, 100 *в* ли майдондан ўтса, 100 *эв* энергия олади ва ҳоказо.

Демак, электр майдони қанчалик кучли ва зарра заряди қанчалик катта бўлса, зарра шунча катта тезланиш ёки энергия олиши мумкин. Буни қуйидаги содда формула ёрдамида ифодалаш мумкин:

$$E = ZeU,$$

бу ерда E — олинган кинетик энергия, Ze — тезлатилаётган зарранинг заряд қиймати; U — кучланиш катталиги. Мана шу принципда зарраларга катта тезлик берадиган қурилмалар зарядли зарраларни тезлатгичлар деб аталади.

33-§. ТЕЗЛАТҒИЧЛАР ТЎҒРИСИДА УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

Биринчи тезлатгичлар йигирманчи йилларда қурилган. Бу даврда катта электр кучланиш олиш техникаси юқори даражада эмас эди. Шунинг учун асосий муаммо юқори кучланиш олиш усулларини топиш билан боғлиқ бўлди. Шуни айтиб ўтиш керакки, тезлатиладиган зарра — снарядларнинг сунъий манбаини кашф қилиш масаласи ўртага ташлангандаёқ, тезлатилиши лозим бўлган зарра ўрнида водород ядроси — протон танланган эди. Протоннинг заряди альфа-зарраниинг зарядидан икки марта кичик. Демак, у ядронинг электростатик майдони билан икки марта кам таъсирда бўлади. Бу — протон ўрганилаётган нишоннинг ядросига анча осонлик билан тушиш имконига эга деган сўздир.

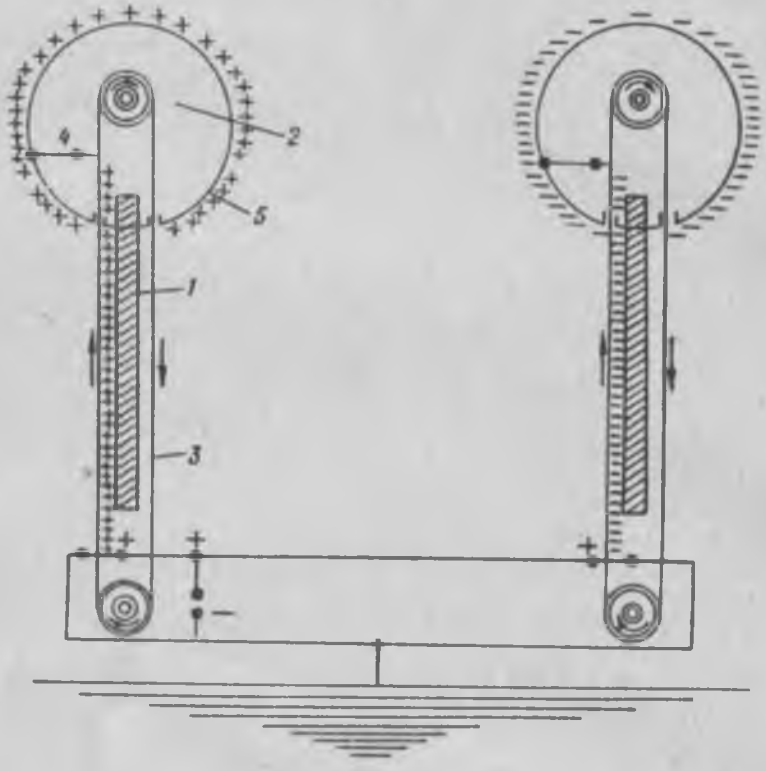
Биринчи тезлатгичларни инглиз олимлари Кокрофт ва Уолтон кашф қилган эди.

Кокрофт ва Уолтон юқори қувватга эга бўлган махсус трансформатор ёрдамида 200 минг вольтли ўзгарувчан кучланишни ўзгармас кучланишга айлантириб махсус схема ёрдамида унинг миқдорини тўрт марта оширишди. Маълумки, конденсаторлар параллел уланган ҳолда уларнинг ҳар бирида потенциал қиймати бир хил бўлади. Агар конденсаторлар кетма-кет уланган бўлса, сўнгги конденсатордаги потенциал қиймати қолган ҳамма конденсаторлардаги потенциалларнинг йиғиндисига тенг бўлади. Кокрофт ва Уолтон кучланишни ошириш учун ўзларининг биринчи тезлатгичларида мана шу қоидадан фойдаланишган.

Шу усулда 800 минг вольт кучланиш билан тезлатилган протонлар ёрдамида литий элементи парчаланган:

$$_3Li^7 + {}_1p^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4$$

Бу тезлатгичда сунъий равишда тезлатилган протонлар билан олинган биринчи ядро реакцияси бўлиб, ядро физикасининг биринчи классик кашфиётларидан ҳисобланади. Кейинчалик Кокрофт ва Уолтон тезлатгичи принципи асосида ишлайдиган бир қанча тезлатгичларнинг мукаммаллаштирилган вариантлари қурилди. 1932 йилда Америкада Ван-де-Грааф бутунлай бошқа принципда ишлайдиган ва унинг номи билан маълум бўлган тезлатгични кашф этди. Ван-де-Грааф тезлатгичида юқори кучланиш электр зарядларини металл шарларнинг сиртида тўплаш усули билан олинади (22- расм). Изолятордан қилинган таянч



22- расм. Ван-де-Грааф генераторининг схематик кўриниши

1 — шиша колонна, *2* — шкив, *3* — изоляция тасмаси, *4* — таёқча, *5* — металл сфера—шар.

устунга (колоннага) ўрнатилган катта металл шарга 20—40 минг вольтли ўзгармас кучланиш манбаидан узлуксиз ҳаракатда бўлган лента (транспортёр) орқали зарядлар кўчирилади. Зарядлар тўпланиши натижасида изолятордаги шар ерга нисбатан катта потенциалга эга бўлади. Ана шу потенциални ер билан туташтирилган электрод найчаларга махсус тақсимлагичлар орқали узатилса, шу найчалар орасида тезлатувчи электр

майдони ҳосил бўлади. Ван-де-Грааф тезлатгичида олинадиган потенциал қиймат шар сиртида тўпланган зарядларнинг миқдорига боғлиқ. Бошқа томондан, металл шар сиртида тўпланган зарядлар зичлиги қанча катта бўлса, унинг электр разряди сифатида юзадан оқиб кетиш эҳтимоли ҳам шунча кўпдир. Шунинг учун ҳам Ван-де-Грааф тезлатгичи — генераторида зарядлар зичлигини ҳаддан ташқари ошириб юбормаслик учун шар диаметрини анча катта қилишга тўғри келади. Одатда, уларнинг диаметри 3—6 метр ва ундан ҳам катта бўлиши мумкин. Масалан, Харьков физика-техника институтида қурилган Ван-де-Грааф генератори шарининг диаметри 10 метрга тенг. Кейинги вақтда Ван-де-Грааф генератори конструкциясига жуда кўп ўзгаришлар киритилди. Генераторни юқори босимдаги (20 атмосферагача) бакка жойлаштирилса, разряд ҳодисасининг содир бўлиш эҳтимоллиги камаяди. Демак, кичик диаметрли шар сиртида зарядлар зичлигини анча ошириш имконияти туғилади. Умуман, Ван-де-Грааф генераторида энергияси 10 *Мэв* гача бўлган протон олинган. Лекин кўпчилик генераторлар заррага асосан 4—5 *Мэв* энергия беради.

Сўнгги вақтларда Ван-де-Грааф тезлатгичининг юқори энергияга мўлжалланган икки, уч ва ундан ҳам кўп поғонали (тандем) турлари пайдо бўлди. Ван-де-Грааф тандем генераторларида тезлатилаётган ионларни қайта зарядлаб, тезлатувчи электр майдонидан бир неча бор қайтариб ўтказиш натижасида сўнгги натижавий энергияниинг қиймати ошириб олинади.

Мусбат зарядга эга бўлган зарра тезлатувчи майдондан ўтиб, манфий қутбли электродга етганда, бу тезлатилган зарра бирор газдан ёки жисмдан ўтказилса, зарра ўзининг электрон қобиғига бир ёки бир неча электронни тортиб олиб манфий зарядли ионга айланиб қолади. Бундай ион тезлатувчи оралиқда тескари томонга ҳаракат қилади, яъни манфий қутбли электроддан мусбат электрод томон ҳаракатланиб, электр майдонидан яна бир бор ўтади. Демак, бу ўтишдан сўнг ионнинг энергияси икки марта ошади. Агар бу ионни мусбат қутбли электродга етгандан кейин, бирор йўл билан (масалан, махсус жисмдан ўтказиб) электронларини «сидириб» олиб мусбат ионга айлантирилса, бу ҳолда ион яна манфий электрод томон йўналиб, тезлатувчи майдондан ўтади ва энергияси янада ортади ва ҳоказо.

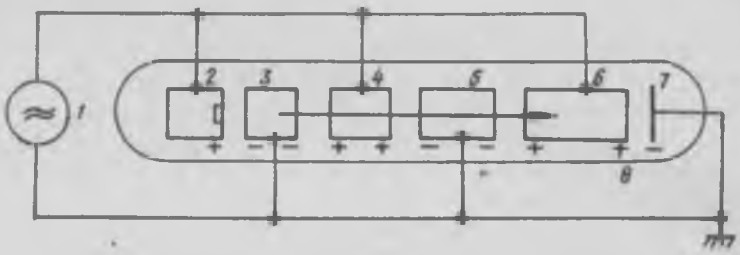
Юқоридаги мисолда уч поғонали тандем генераторининг ишлаш принципини кўрдик. Шундай қилинганда Ван-де-Грааф тезлатгичида ионлар энергияси 30—36 *Мэв* гача етказилади.

Кокрофт — Уолтен ва Ван-де-Грааф тезлатгичларида зарраларга бевосита ва фақат жуда юқори қийматга эга бўлган кучланиш ёрдамида тезланиш берилади. Бундай усулда тезлантиришнинг камчиликлари борлиги дастлабки йиллардаёқ аён бўлиб қолди. Биринчидан, юқори кучланишни осонлик билан олиш имконияти бўлган тақдирда ҳам, бундай кучланиш-

ни узатишда ўтказгичлар сиртида содир бўладиган разряд ҳодисаси унинг қийматини чеклаб қўяди. Иккинчидан, юқори кучланиш катта ва махсус изоляторлар яратиш масаласини ҳам ҳал қилишни талаб этади. Изоляторлар ҳам техниканинг мураккаб масалаларидан биридир. Бу қийинчиликлар биринчи тезлатгичларда ионлар энергиясини яна ҳам оширишга тўсқинлик қилди. Ядро физикасининг тез ривожланиши фақат бундай тезлатгичлар билан қониқиб қола олмасди.

Енгил ва ўртача оғирликдаги элементлар ядроларининг электростатик итариш кучларини енгиб ўта олиши учун зарраларни 8—12 *Мэв* ва ундан ҳам юқори энергиягача тезлатиш керак. Бинобарин, илмий-тадқиқот ишларининг талаби ва эҳтиёжи янги типдаги тезлатгичларни кашф қилишни тақозо қиларди.

Биринчи тезлатгичлар мунтазам равишда ишга тушмасданоқ, йигирманчи йилларнинг охирида зарядли зарраларни тезлатиш учун ўзгармас кучланиш эмас, балки ўзгарувчан кучланишдан фойдаланиш мумкин деган фикр туғилди. Ўзгарувчан кучланишдан фойдаланишни тушуниб олиш учун чизиқли резонанс тезлатгичининг схемасига (23-расм) мурожаат қиламиз.



23-расм. Слоан ва Лоуренс чизиқли резонанс тезлатгичининг тузилиш схемаси:

1 — юқори частотали кучланиш манбаи. *2* — ион манба. *3—4—5—6*—тезлатувчи найсимон электродлар. *7* — нишон. *8* — қобиқ.

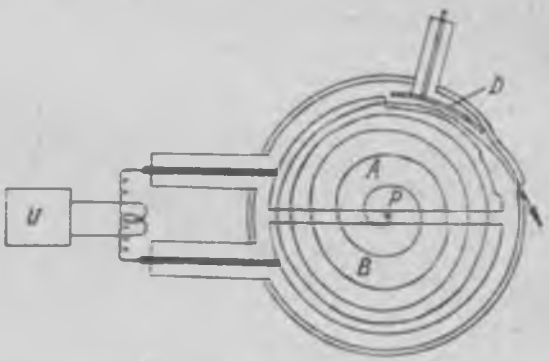
Маълум бир вақтда юқори частотали ўзгарувчан кучланиш манбаи (генератор)дан узатилаётган кучланишнинг тезлатувчи электрод — найлардаги қутб белгиси схемада кўрсатилгандек бўлсин, яъни биринчи тезлатувчи найда манфий, иккинчи найда мусбат ва ҳоказо (ион манбаи ўрнашган найда ҳам мусбат). Бунда найлар экран хизматини ўтайди, шунинг учун улар ичида электр майдони йўқ. Найлар ўртасидаги оралиқдагина электр майдони бўлади. Ион манбаидан чиққан зарра (ион) мусбат зарядли бўлиб, у биринчи тезлатувчи най томон йўналади (схемада бу найнинг номери *3*). Ион оралиқдаги масофани ўтган сари унинг тезлиги ортаверади ва бутун оралиқни ўтиб найга етиб келганда, шу оралиқдаги электр майдони қийматига мос бўлган тезланиш олади.

Бу тезлатгичда биринчи найнинг узунлиги шундай олинганки, уни ўтиш учун нонга керак бўлган вақт, ўзгарувчан кучланишининг ярим даврига тенг. Демак, нон биринчи найдан чиқиши билан найлардаги қутб белгилари ўзгаради, яъни биринчи найда мусбат, иккинчисида манфий ва ҳоказо бўлиб қолади. Ион иккинчи найнинг манфий қутбига тортилиб тезланиш олади, бошқача қилиб айтганда, иккинчи оралиқ ҳам ион учун тезлатувчидир. Ион инерция таъсирида иккинчи найга киради. Аммо, унинг тезлиги энди икки марта кўп, бинобарин, иккинчи найдан ўтиш учун керак бўлган вақт яна ўзгарувчан кучланишнинг ярим даврига тенг бўлсин учун най узунлиги икки марта катта бўлиши лозим. Шу шарт бажарилгандагина, ион иккинчи найдан учинчи оралиққа чиққанда қутб ишораси яна тескарисига, яъни схемада кўрсатилгандек ўзгарган бўлади. Ион учинчи оралиқда ҳам тезланиш олиб, у биринчи найга киргандагидан уч марта, иккинчи найга киргандагидан бир ярим марта катта тезликда учинчи найга киради. Ион учинчи найдан ҳам яна бир хил вақтда ўтсин учун учинчи найнинг узунлиги ионнинг охирги тезлигига мувофиқ равишда катта бўлиши керак. Демак, юқорида айтганларимиздан шундай хулоса чиқариш мумкинки, чизиқли резонанс тезлатгичда ионнинг бир тезлатувчи оралиқдан иккинчи тезлатувчи оралиққа чиқиш вақти доим бир хил бўлиши ва у юқори частотали кучланишнинг ярим даврига доим тенг бўлиши керак экан. Кучланиш даври билан ионларнинг найлардан ўтиш вақти орасидаги мувофиқлик, яъни ионнинг тезлатувчи оралиққа келиши билан кучланиш даври ўзгаришида «такт», синхронлик борлиги учун Слоан ва Лоуренснинг юқорида баён этилган тезлатгичи резонанс тезлатгич деб аталди.

Чизиқли резонанс тезлатгичларнинг асосий камчилиги унинг ниҳоят даражада катталигидир. Чунки тезлатгичнинг ишлаш принципига кўра, у қанчалик катта энергияга мўлжалланган бўлса, ундаги электрод-найлар сони шунчалик кўп бўлади ва уларнинг узунлиги узлуксиз равишда ортиб боради. Шунинг учун ҳам ўн *Мэв* ва ундан ҳам юқори энергияга мўлжалланган тезлатгичларнинг умумий узунлиги бир неча ўн ва юз метр бўлади. Тезлатувчи найлар узунлигини қисқартиш учун кучланишнинг даврий ўзгаришини ошириш, яъни генератор частотасини ошириш керак. Лекин юқори энергияли тезлатгичлар учун бундай генераторлар берадиган қувват бир неча юз киловаттга тенг бўлиши керак. 30-йилларда кичик тўлқин узунлигига эга бўлган жуда катта қувватли генераторларни қуриш имконияти йўқ эди. Шунинг учун ҳам биринчи қурилган тезлатгичларда тезлиги кичик бўлган оғир нонлар (бир хил энергияга эга бўлгаи икки хил зарранинг оғирроғи кам тезликка эга бўлади) тезлатилган.

Демак, кичик кучланиш билан юқори энергия олиш ғояси биринчи чизиқли резонанс тезлатгичларда ўз ифодасини топ-

мади. Биринчи чизиқли тезлатгич муаллифларидан бири Эрнест Лоуренс чизиқли тезлатгичнинг асосий камчилигидан қутулиш учун ионларни тўғри чизиқли ҳаракатда тезлаштирмасдан, тезлатувчи оралиқларни кўндаланг магнит майдонига жойлаб, зарраларни айланма орбиталар бўйича тезлатишни таклиф этди. Бу тезлатгичда ҳам ўзгарувчан электр майдонидан фойдаланилади, аммо электродлар сони фақат иккита бўлиб, улар най шаклида эмас. Электродларнинг шакли грек алфавитининг *D* ҳарфига ўхшаш бўлиб, одатда улар дуант деб аталади. Икки электрод — дуант орасида тезлатувчи оралиқ бўлиб, бу оралиқда тезлатилаётган ионларга айланма ҳаракат бериш учун дуантлар бир жинсли доимий магнит майдонига жойланади. Бир жинсли магнит майдони цилиндр шаклидаги электромагнит ўзаклари ёрдамида ҳосил қилинади. Бу тезлатгичнинг ишлаш принципини ўрганиш учун 24- расмга мурожаат қиламиз. Расм-



24- расм. Циклотронда тезлатилган зарранинг ҳаракат йўли.

P — ион манба; *A*, *B* — дуантлар; *U* — генератор; *D* — бурувчи дефлектор.

да *A* ва *B* дуантлар, *U* — юқори частотали кучланиш манбаи — генератор, *P* — ионлар манбаи — тезлатгичнинг марказига жойлаштирилган. Ионлар манбадан чиқиб манфий кучланиш таъсирида *B* дуантга тортилади. Дуантлар кўндаланг магнит майдонига жойлашган бўлгани учун, ионлар токини тик кесиб ўтаётган магнит куч чизиқлари билан ўзаро таъсири натижасида ҳосил бўладиган Лоренц кучи ионларни айланма ҳаракат қилишга мажбур этади.

Лоренц кучининг йўналиши чап қўл қоидаси бўйича аниқланади.

Айланма ҳаракатдаги ион дуантдан чиқиб яна тезлатувчи оралиққа келганда, *A* ва *B* дуантдаги кучланиш қутблари тескарисига алмашган бўлади. Демак, ион тезлатувчи оралиқдан ўтиб тезланиш олади. Тезлиги ортгани учун инерцияси ҳам

кўп бўлиб, ион дуантнинг ичкарисига анча киради ва яна магнит майдони таъсирида ярим айлана чизиб, *А* дуантнинг четига келади, шу пайт дуантлардаги қутб ишораси тескарисига ўзгаради, яъни дастлабки ҳолига келади. Ион манфий ишорага эга бўлган *В* дуантга яна тортилади. Яна тезланиш олиб, дуант ичида каттароқ радиусга эга бўлган ярим айлана чизиб, яна дуантнинг четига келади. Дуантларнинг қутб ишораси яна ўзгаради ва ион яна тезланиш олиб оралиқдан ўтади ва шу тарзда тезланиш орта боради. Ион дуантлар орасидан кетма-кет ўтиши натижасида айланма ҳаракат қилиб, тезланишини орттириб бораверади. Ион ҳар бир босқичда янги тезланиш олган сари, унинг тезлиги оша бориб, ҳаракатланиш айланаси ҳам катталашаверади. Ҳаракатланиш айланасининг радиуси дуант радиусига тенглашиб қолганда, тезлатилган ион йўлига у билан бомбардимон қилинадиган махсус нишон қўйилади ёки тажриба шарт-шароитига қараб, уни тезлатувчи камерадан махсус бурувчи — дефлектор ёрдамида ташқарига чиқарилади.

Юқоридагилардан кўриниб турибдики, бу тезлатгичда электр майдони ионларни тезлатувчи бўлса, магнит майдони эса ионлар ҳаракатини бошқарувчи бўлиб хизмат қилади. Бу тезлатгичда ҳам ионларнинг тезлатувчи оралиққа келиш вақти билан тезлатувчи электрод-дуантлар қутб ишораларининг ўзгаришида мувофиқлик бўлиши тезлатишнинг асосий шарти экан.

Ионларнинг тезлатувчи оралиққа келиши ва потенциаллар айирмаси қутб ишоралари ўзгариши ўртасида бир «такт», яъни резонанс бўлганлиги ва ионлар тезлатиш жараёнида айланма ҳаракатда бўлганликлари учун, бундай тезлатгичларни циклли резонанс тезлатгичлар ёки қисқача қилиб ***циклотрон*** деб атадилар.

Ядро физикасининг ривожланиш тарихида, айниқса унинг бошланғич даврида циклотроннинг ҳиссаси ниҳоятда катта бўлди. Циклотронда 20 *Мэв* гача тезлатилган протонлар ва дейтронлар билан қатор нодир тажрибалар ўтказилдики, улар ядро реакциясини ўрганиш бўйича олиб борилган илмий-тадқиқот ишларида янги бир босқич ясади. Циклотроннинг кашф қилиниши ва ундан фойдаланиш фақат ядро физикасидагина эмас, балки янги-янги тезлатгичлар кашф этилишида ва умуман тезлатгичлар техникасининг ривожланишида катта роль ўйнади.

Циклотроннинг такомиллаштирилган варнантларида элементар зарраларнинг энергиясини 20—25 *Мэв* гача ошириб, уларнинг интенсивлиги 500 ва ундан ҳам кўп микроампергача етказилди. Умуман, циклотрон, тезлатгичлар орасида тезлатилган ионларнинг энг кўп интенсивлигини берадиган асбобдир. Лекин, циклонтронда олинган дастлабки маълумотлар ва ядро ички тузилишининг хусусиятлари ионлар интенсивлиги билан бир қаторда, уларнинг энергиясини кескин ошириш лозимлигини тақозо қиларди. Ионлар энергияси қанчалик катта бўлса,

уларнинг ўрганнлаётган ядрога кириши ва уни парчалаш эҳтимоллиги шунчалик катта бўлади, ядрони ташкил қилган нуклонлар билан бевосита тўқнашувига имкон яратилади ва ионнинг ядрога олиб кирган кинетик энергиясига яраша ядро ички кучларининг динамик ҳолати кучлироқ ўзгартирилади. Бундай ҳолларда ҳар бир содир бўладиган ядро реакциясидан олинадиган маълумот бой ва хилма-хил бўлади. Циклотроида ион энергиясини 20—25 *Мэв* дан ошириб бўлмасликка сабаб тезлатиш жараёнида катталашиб бораётган зарра тезлигига мувофиқ равишда унинг массасининг релятивистик ошиб боришидир. Бу ҳолни тушунтириш учун циклотронда ионларни тезлатиш шартини содда формулалар ёрдамида ифодалаймиз.

Циклотроида ионларни айланма ҳаракат қилишга мажбур қилувчи куч Лоренц **кучидир:**

$$F_л' = \frac{e}{c} vH, \tag{23}$$

бу ерда e — электрон зарядига тенг бўлган ион заряди, v — ион тезлиги H — магнит майдони кучланганлигининг қиймати. Ион орбитасининг ҳар бир нуқтасида Лоренц кучига тенг ва унга тескари йўналган марказдан қочирма куч ионга таъсир этади. Айлананинг ҳар бир нуқтасида Лоренц ва марказдан қочирма кучлар бир-бирига тенгдир, яъни

$$F_л = F_{м.қ.}, \qquad \frac{e}{c} vH = \frac{mv^2}{R} \text{ ёки } \frac{mv}{R} = \frac{eH}{c}. \tag{24}$$

(24) формула ионнинг циклотроида асосий ҳаракатланиш тенгламасидир. Энди ионнинг айланиш даври (T) ни топамиз. Айлана узунлиги $s = 2\pi R$. Шу айланани ўтишга кетган вақт

$$T = \frac{s}{v} = \frac{2\pi R}{v}. \tag{25}$$

Бу формулага (24) дан фойдаланиб, айлана радиуси R нинг қийматини қўямиз:

$$T = 2\pi \frac{mc}{eH}. \tag{26}$$

Бу формуладан кўриниб турибдики, ионнинг айланиш даври унинг массаси ва бошқарувчи магнит майдон кучланганлигига боғлиқ экан. Агар магнит майдонининг қийматини доимий қилиб турилса, ион тезлигининг кўтарилиши массанинг релятивистик ошиб боришига олиб келади. Ион массасининг ошиши унинг айланиш даврини оширади, бу эса циклотронда **тезлатишнинг** асосий шарти — ионнинг айланиш даври билан тезлатувчи кучланиш даври орасидаги резонанс, яъни мувофиқликнинг бузилишига олиб боради. Масса ортган сари резонанснинг бузилиши ҳам кўпаяверади ва натижада ион дуантлар орасига келганда, электр майдони тезлатувчи эмас, балки ионни секин-

лаштирувчи майдонга айланиб қолади. Ионларни тезлатишда мана шу ҳодисанинг мавжудлиги циклотронда ионлар оладиган энергияни чеклаб қўяди.

Ўз-ўзидан кўриниб турибдики, резонансни сақлаб, тезлатиш жараёнини ионнинг анча катта энергия олишигача давом эттиришни истасак, массани релятивистик ортиши натижасида ионнинг айланиш даврига мувофиқ равишда кучланиш ўзгаришининг даврини ҳам ошириб бормоқ лозим.

Бу масала юқори частотали генератор частотасини камайтириб бориш йўли билан ҳал этилади. Мана шу асосда ишлайдиган тезлатгич циклотронда қилинган тажрибанинг ривожланиши натижасида пайдо бўлди. Бундай тезлатгич ***фазотрон*** номи билан маълумдир. Фазотрон, тезлатгичлар техникасининг ўсишида навбатдаги босқич бўлди.

Ҳозирги кунда фазотронларда протон 700—800 *Мэв* энергиягача тезлатилади. Агар ионларнинг энергиясини бундан ҳам оширмоқчи бўлсак, жуда катта энергиядаги (яъни тезликдаги) ионларни айланма ҳаракатини бошқариш учун магнит майдонининг қийматини яна ҳам ошириш керак. Шундай қилинганда гигант магнит ўзакларидан фойдаланиш тезлатгични ниҳоят даражада қўполлаштириб, унинг таннархини кескин ошириб юборади. Ионлар энергиясини яна ҳам ошириш йўлидаги бу тўсиқни бартараф қилиш учун ионларни ўсиб борадиган бурама чизиқлар бўйича тезлатмасдан, балки бир орбитада тезлатиш керак. Бу ҳолда катта радиусга эга бўлган магнит ўзаги ўрнига ҳалқа шаклидаги магнит ишлатилади. У анчагина енгил бўлиб ион шу магнит радиусига тенг доимий орбитада айланади. Энергия ортиб бориши билан ион орбитадан чиқиб кетмаслиги учун магнит майдонининг қиймати ҳам энергия ўсишига мувофиқ ошиб бориши керак.

Ион бир орбитада тезлатилганда, табиийки, дуантлар бўлмай, балки ҳалқанинг периметри бўйича бир неча найлар ёрдамида тезлатувчи оралиқлар ясалади.

Демак, бу асосда ишлайдиган тезлатгичларда тезлатиш жараёнида ион массасининг релятивистик ортиши кучланишнинг частотасини камайтириш билан қопланса, ион орбитасининг доимийлиги магнит майдонининг қийматини ошириш билан таъминланади.

Бундай принципда ишлайдиган тезлатгич ***синхрофазотрондир.*** Агар тезлатилаётган зарранинг тезлиги тезлатиш жараёнида амалда кам миқдорда ўзгарса, у ҳолда бундай заррани доимий частотали кучланиш билан бир орбитада тезлатиш мумкин. Бундай принципдан асосан электронларни тезлатишда фойдаланилади. Демак, электронни ҳалқа магнит майдонининг қийматини ошириб бориш билан доимий орбитада ушлаб, ўзгармас частотали кучланиш билан тезлатиш мумкин экан. Электронни тезлатиш учун мўлжалланган ҳалқасимон тезлатгич ***синхротрон*** деб аталади. Синхротронда тезлатилган элек-

троннинг энергияси 6—7 миллиард электрон-вольтгача етиши мумкин.

Электронни бир неча ўн миллион электрон-вольтгача тезлатишга мўлжалланган тезлатгични ***бетатрон*** дейилади. Бетатроннинг ишлаш принципи биз кўриб чиққан тезлатгичларнинг бирортасига ҳам ўхшамайди. Магнит майдони ортиб бораётган ўзак атрофида электр юритувчи куч пайдо бўлади. Агар электр юритувчи куч (э. ю. к.) зонасига бирор йўл билан электрон киритилса, э. ю. к. таъсирида у айланма ҳаракат олиб, тезланади. Магнит майдонининг ортиш тезлиги э. ю. к. қийматини аниқлайди. Табиийки, э. ю. к. қанча катта бўлса, электрон шунча кўп тезлашади, яъни катта энергияга эга бўлади.

Тезлатгичлар тарихи ва улар тўғрисидаги умумий маълумотлар тезлатгичлар техникаси нақадар тез ривожланганини кўрсатиб турибди. Дастлабки тезлатгичлар оддий лаборатория столи устига жойлаштириладиган асбоб бўлган бўлса, ҳозирги кунда қурилаётган тезлатгичлар эса ҳашаматли катта биноларни эгаллайдиган, минглаб тонна оғирликдаги гигант қурилмаларга айланди.

34-§. ИОНЛАРНИНГ ОРБИТАЛ ТУРҒУНЛИГИ

Ҳозирги замон тезлатгичларида ионларни тезлаштириш жараёни уларнинг айланма (орбитал) ҳаракати билан аниқланади. Айланма ҳаракатдаги ионлар тезланиш бошланишидан мўлжалланган энергияни олгунга қадар жуда катта масофани ўтади. Ҳозирги кунда қурилаётган катта синхрофазотрон ва синхротронларда бу масофа бир неча юз минг километрни ташкил этади. Бундай катта масофани ионлар осонлик билан ўтармикин, уларнинг маълум орбитадаги ҳаракатига халақит берувчи ҳодисалар мавжуд эмасмикин, яъни ионлар тезлантирилаётганда уларнинг орбитал турғунлиги таъминланганмикин деган саволлар пайдо бўлади. Турли тезлатгичларда тезланиш жараёнларини соддалаштирилган ҳолда тушунтирганимизда, ионларни тезлатишда ортиқча қийинчиликлар йўқдай бўлиб кўринади. Аслида бундай эмас. Ионларнинг тезланиш ҳаракатида уларнинг орбитал турғунлигини таъминлаш энг муҳим ва нозик ишдир. Бу иш мураккаб математик аппаратлар воситасида ҳисоблаш йўли билан ҳал этилиб, ҳар бир конкрет тезлатгичнинг ишлаш принципининг назарий негизини аниқлайди. Биз бундай махсус ҳисоблаш ишларини батафсил кўриб ўтирмаймиз, чунки бу мураккаб масаладир. Лекин, тезлатгичларда бўладиган ҳар хил физик ҳодисалар ва уларнинг математик ифодаларини содда тенгламалар ёрдамида тушуниб олиш зарурдир.

Ионларни тезлатиш жараёнида нима учун уларнинг орбитал турғунлигини таъминлаш масаласи ўртага ташланди? Ионлар манбаидан чиқаётган ионлар тезлатувчи оралиққа тортилишида параллел даста тариқасида чиқмасдан, балки маълум бурчакда

ёйилиб чиқади. Ион дастасининг бундай ёйилиб чиқишига ионларни тортувчи электр кучланишининг мутлақо бир жинсли бўлмаслиги сабаб бўлади. Электр куч чизиқларининг тезлатувчи оралиқдаги эгрилиги ионларни шу куч чизиқлари йўналишида чиқишига олиб келади.

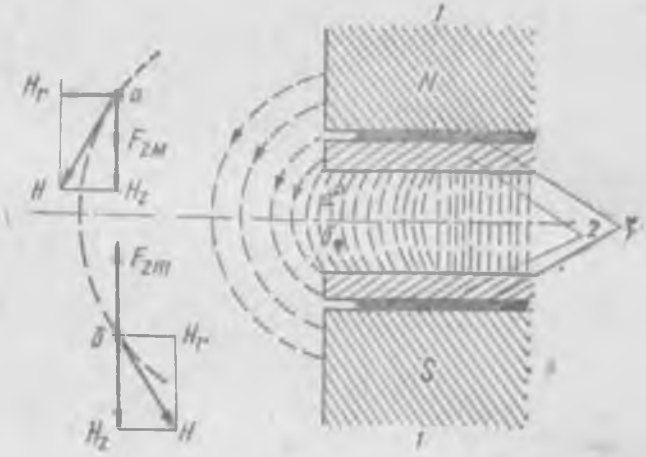
Иккинчидан, ионлар тезлатилаётган ҳажмда (камерада) қанчалик юқори даражада ҳаво бўшлиғи — вакуум ҳосил қилинган бўлмасин, барибир бу ҳажмда маълум миқдорда газ қолдиги бўлади. Шу газнинг молекула ва атомлари билан тўқнашган ионлар, орбиталардан чиқиб кетиши мумкин. Ниҳоят, тезлатилаётган ион дастасидаги бир хил зарядли зарралар ўзаро итарилишади. Бу ҳол айниқса тезлатиш бошланаётган вақтда, ионларнинг тезлиги ҳали унча катта бўлмаган пайтда сезиларли таъсир кўрсатади. Шуни ҳам айтиб ўтиш керакки, юқорида кўриб ўтилган сабабларга кўра ионлар ўз орбиталаридан фақат катта ёки кичик радиус томон чиқиб қолмасдан, балки ихтиёрий йўналишда «қочиши» мумкин. Асосий вазифа ионларни ҳисобланган радиусли орбитада сақлаб қолишгина эмас, балки бошқарувчи магнит майдонининг медиан текислиги деб аталувчи икки магнит ўзагининг ўрта текислигида ушлаб қолишдир. Демак, ионларнинг орбитал турғунлигини таъминлаш уларни горизонтал текисликда — радиал турғунлигини ва вертикал текисликда — вертикал турғунлигини таъминлашдан иборат.

Шуниси қизиқки, биринчи тезлатгичларнинг ижодкорлари ионларни тезлатишда уларни орбитал турғунлигини таъминлашдек муҳим масала борлигини хаёлларига ҳам келтиришмаган. Тез орада шу нарса маълум бўлдики, магнит ўзининг асосий бошқарувчилик вазифасидан ташқари ионларнинг орбитал турғунлигини таъминлашга ҳам хизмат қилиши мумкин экан.

Доимий магнитнинг тузилиши ионларнинг горизонтал текисликдан қочишига қарши чора кўриш имконини осонлаштиради. Тезлатгичларда маълум текислик ёки орбиталардан четлашувчи ионларни ўз орбитасига ва медиан текисликка қайтаришни ***ионларни фокуслаш*** дейилади. Юқорида айтганимиздек, бошқарувчи магнитдан ионларни фокуслаш мақсадида ҳам фойдаланиш мумкин. Маълумки, доимий магнит ўзаклари орасида магнит майдони бир хил бўлиб қолавермайди. Қутб ўзакларининг марказидан узоқлашган сари магнит майдонининг қиймати камайиб боради. Магнит майдони қийматининг ўзгариши жуда оз бўлса-да, лекин ионларни фокуслаш учун тезлатгичларда у жуда кераклидир. Агар магнит майдони ўзгармас бўлса, куч чизиқлари тўғри чизиқли бўлади. Магнит майдонининг катталиги ўзакнинг марказидан четига томон ўзгарган сари куч чизиқларининг шакли тўғри чизиқдан эгри чизиққа ўзгара бошлайди. Агар магнит майдонининг қиймати орта борса, унда куч чизиқлари ботиқ эгри чизиқ, яъни ичкарига букилган эгри чизиқ

шаклида бўлади, акс ҳолда куч чизиқлар қаварик шаклда, яъни ташқарига букилган чизиқ шаклида бўлади.

25- расмда марказдан узак четига камайиб борувчи магнит майдони куч чизиқларининг шакли кўрсатилган. Тўғри чизиқ шаклидаги куч чизиқлари, горизонтал текисликда ҳаракатланувчи ионларга тик равишда узининг тўлиқ қиймати билан таъсир қилади. Бундай куч чизиқлари ионларни айлана бўйича ҳаракат қилишга мажбур қилади. Магнит марказидан нарида бўлган қаварик шаклдаги куч чизиқлари эса, ионга узининг тўла кучи билан таъсир қилмайди. Бундай куч чизиқларининг тўлиқ қиймати йўналишини топиш учун эгри чизиққа уринма ўтказиш



25- расм. Магнит куч чизиқларининг ҳаракатланаётган ионга таъсири.

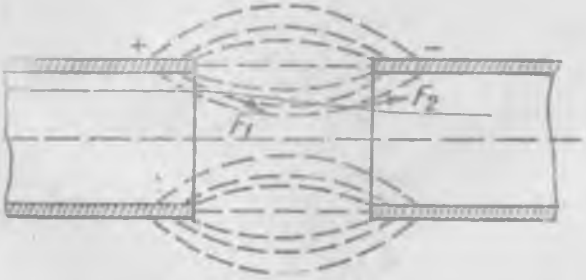
1 — магнит қутблари, 2 — тезлатувчи камеранинг қопқоқлари, магнит майдонини ўзгартувчи дисклар. Чапда «Q» куч чизиғи катта масштабда кўрсатилган.

керак. Бу уринма йўналишидаги кучнинг ионга таъсирини аниқлашдан аввал қуйидагини эслатиб ўтиш лозим. Ҳар бир жисмга қандайдир бурчак остида таъсир қилаётган куч, жисмга ўзининг тўлиқ қиймати билан таъсир қилмай, балки ташкил этувчи кучлар билан таъсир қилади. Бошқача қилиб айтганда бирор бурчак остида таъсир этувчи кучни горизонтал ва вертикал ўқлардаги проекцияларини топиш, яъни ташкил этувчиларга ажратиш мумкин. Биз ҳам, қаварик куч чизиқларидан бирини олиб (расмда чапда, аниқроқ кўринниши учун, уни каттароқ қилиб олинди), унга уринма ўтказамиз ва унинг горизонтал (H_r) ва вертикал (H_z) ташкил этувчиларини топамиз. Қаварик эгри чизиқ тезланувчи ионларга узининг ана шу ташкил этувчилари билан таъсир қилади. Энди ана шу ташкил этувчиларнинг ҳар бирининг ионга таъсирини алоҳида кўриб чиқайлик. Куч чизиқнинг вертикал ташкил этувчиси магнитнинг марказидаги куч чизиқ каби, ионга айланма ҳаракат беради. Демак,

бу ташкил этувчи ион ҳаракатини бошқаради. Горизонтал ташкил этувчи (H_r) нинг ион билан ўзаро таъсирини чап қўл қонда-си асосида топамиз. Ҳосил бўлаётган куч (Лоренц кучи) вертикал йўналишга эга бўлиб (расмда бу куч $F_{гм}$ билан кўрсатилган), у ионга юқоридан пастга қараб таъсир қилади. Демак, магнит майдони ёрдамида ионларни фокуслаш кучининг горизонтал ташкил этувчиси ёрдамида бажарилар экан. Магнитнинг четига яқинлашган сари, куч чизиғининг эгилиши катталашади. Куч чизиғининг эгилиши қанча катта бўлса, унинг горизонтал ташкил этувчиси ҳам шунча катта бўлади. Демак, магнит ўзакларининг четига яқинлашган сари, горизонтал ташкил этувчининг катталашиши ҳисобига магнит майдони билан фокуслаш самараси яхшиланиб бораверади. Биз ўрта текисликдан юқорига ҳаракатланган ионни фокуслашни кўрдик. Ўрта текисликдан пастга ҳаракатланган ионлар ҳам шу тариқа магнит куч чизиғининг медиан текислик пастидаги горизонтал ташкил этувчилари ёрдамида қайтарилади.

Радиал йўналишда фокуслаш марказдан қочирма ва марказга интилма кучлари ўртасидаги фарқ ҳисобига бўлади. Дарҳақиқат, ҳар бир ион доиравий орбита бўйича ҳаракатланиши учун, илгари кўрганимиздек, марказдан қочирма куч билан Лоренц кучи туфайли мавжуд бўлган марказга интилма куч ўртасида мувозанат ўрнатилиши керак. Магнит майдони катталигининг марказдан четга камайиб боришини шундай ҳисоблаб олиш мумкинки, бу ҳолда ҳисобланган радиусдан ичкарига, яъни кичик радиусга томон қочган ионларга кўрсатилган қаршилик марказдан қочирма куч фойдасига бўлади. Шунинг учун бу ионлар ички радиусдан ҳисобланган орбитага қайтарилади. Ҳисобланган орбитадан катта радиусга қочган ионлар учун Лоренц кучи таъсири кўп бўлиб, ионлар ичкарига, яна ҳисобланган орбитасига қайтарилади. Ионларнинг радиал турғунлиги шундай таъминланади.

Тезлатувчи электр майдони ёрдамида ҳам ионлар фокусланади. Айниқса, тезлатишнинг бошланғич қисмида электр майдонининг фокуслашдаги роли катта. 26- расмда икки тезлатувчи электроднинг кўндаланг кесими ва улар орасидаги электр май-



26- расм. Ионларнинг электр майдони ёрдамида фокуслаш схемаси (F_1 — фокусловчи куч. F_2 — дефокусловчи куч).

дони куч чизиқларининг йўналиши кўрсатилган (пунктир чизиқлар). Кўриниб турибдики, куч чизиқлари бир электроддан иккинчи электродга тўғри чизиқ бўйича йўналмасдан, балки эгри чизиқлар бўйича йўналяпти. Электродлар орасидаги масофа қанча катта бўлса, электр куч чизиқларининг «салқиланиши» шунча катта бўлади ва, аксинча. Одатда икки электрод орасидаги электр майдони куч чизиқларининг бундай эгилишини электр майдони куч чизиқларининг ана шу «салқиланиш» хусусияти, тезлатувчи оралиққа тушган ионларни горизонтал текислик томон фокуслаш имконини беради.

Айтайлик, ион чап электроддан ўнг электрод томон йўналган бўлсин (26-расмда ион йўли узлуксиз қора чизиқ билан кўрсатилган). Тезлатувчи оралиқнинг чап ярмида куч чизиқлари юқоридан пастга йўналган (биз, электродларнинг юқори деворлари ўртасида ҳосил бўлаётган куч чизиқларини кўряпмиз), ўнг ярмида эса, пастдан юқорига йўналган. Бундай ҳолда, чап томондаги электроддан чиқиб, тезлатувчи оралиққа келган ион пастга йўналган куч чизиқлари таъсирида ўз йўналишини пастга томон ўзгартиради. Демак, бу ион электродлар томон фокусланади. Электродлар оралиғи ўрта чизиғидан ион ўтганда куч чизиқларининг йўналиши тескарисига ўзгарганп учун у ҳам ўз йўналишини пастдан юқорига ўзгартиради. Демак, тезлатувчи оралиқнинг иккинчи ярмида ионлар горизонтал текисликдан қочганлиги учун улар фокусланмади, фокуслашнинг акси бўлди. Тезлатгичлар техникасида буни ион дефокусланди дейнлади.

Демак, электродлар орасига тушган ион оралиқнинг биринчи ярмида фокусланади, иккинчи ярмида эса дефокусланади.

Тезлатувчи оралиқнинг чап ярмида ионнинг тезлиги унча катта эмас. Оралиқнинг ўнг ярмини эса ион маълум тезланиш олгандан сўнг чап ярмидагидан каттароқ тезлик билан ўтади, яъни ион оралиқнинг ўнг ярмини чап ярмига нисбатан камроқ вақтда ўтади. Шундай экан, ион тезлатувчи оралиқнинг фокусловчи ярмида дефокусловчи ярмидагига нисбатан кўпроқ вақт бўлди. Шунинг учун ҳам ионни фокуслаш билан дефокуслаш ўртасидаги фарқ фокуслаш фойдасига бўлади, яъни фокуслаш ва дефокуслаш эффектлари айирмаси натижасида ион йўли горизонтал текислик томон эгилади. Юқорида қайд қилиб ўтганимиздек, ионларни электр майдони билан фокуслаш уларнинг тезлиги ҳали унча катта бўлмаган пайтда самаралидир, чунки электр майдони билан фокуслаш ионларнинг тезлатувчи оралиқдан ўтишида тезликнинг нисбатан ўзгаришига боғлиқ. Агар ионнинг тезлатувчи оралиққа тушиш пайтида тезлиги унча катта бўлмаса, уни электродлар орасининг чап ва ўнг ярмидаги тезликлари нисбати сезиларли бўлиб, уларнинг айирмаси сезиларли фокуслаш эффектини беради. Ионлар тезлиги катта бўлганда, улар тезлатувчи оралиқни тез ўтиб кетадилар, натижада фокуслаш ва дефокуслаш эффекти ўртасидаги фарқ кичик бўлади.

35-§. ИОНЛАРНИНГ ФАЗАВИЙ ТУРҒУНЛИГИ

Резонанс тезлатгичларнинг ишлаш принципида энг асосий шарт тезлатилаётган ионларни тезлатувчи оралиққа келиш вақти билан кучланиш частотасининг мос равишда ўзгаришидадир. Циклли тезлатгичларда, яъни ионларга айланма ҳаракат йўли билан тезланиш берувчи тезлатгичларда кучланиш частотасига ионнинг айланиш частотасининг тенглиги бутун тезлатиш давомида сақланган бўлиши керак. Тезлатгичларда бу шарт қандай бажарилади?

Тезлатгичларда қувват ортган сари (улардаги ионларнинг энергияси катталашган сари) тезлатилган ионларнинг интенсивлиги камайиб боради. Масалан, циклотроидан ток кучи 1 *ма* бўлган интенсивликдаги ионлар олинса, фазотрон ва синхротронлардан бунга қараганда юз минг марта ва ундан ҳам кам миқдорда интенсивлик олинади.

Ионлар интенсивлигининг кескин камайиб кетишига асосий сабаб, тезланиш жараёнида тезлатилаётган ионлар фазавий тургунлигининг тўлиқ таъминланмаганлигидадир. Ионларнинг фазавий турғунлиги ўзи нима? Биз тезлатгичларнинг турли хилларининг ишлаш асослари билан танишиб чиққанимизда, тезлатиш жараёнини соддалаштирилган ҳолда кузатиб бордик. Юқори частотали кучланишни тезлатувчи фактор деб олиб, ионлар тезланишининг ошиши кучланишнинг фақат максимал қийматига, яъни синусоиданинг амплитуда қийматига боғлиқдир, деб қарадик. Ҳолбуки, ионлар ионлар манбаидан тезлатувчи оралиққа дастлаб тортилишида кучланиш (синусоида) ярим даврининг маълум бир фазаси билан тортилмасдан, балки шу ярим даврнинг тўла қийматн билан тортилади. Демак, шу ярим даврга тенг вақт ичида ионларнинг оралиққа тортилиши давом этади. Тезлатувчи оралиққа тортилган ионлар дастаси маълум узунликка эга бўлган ионлар оқими бўлиб чиқади, деган сўздир. Шундай йўл билан тезлатилган ионлар кучланишнинг тезлатувчи ярим даврининг ҳар хил фазасида тезлатилиб, кам миқдор кучланиш билан тезлатилган ионлардан орқада қола бошлайди. Ионлар оқими узунлиги катталашаверади. Агар сўнгги ҳисобланган энергияни олиш учун ион бир неча юз ва минг айланма ҳаракат қилиши керак бўлса, ҳар бир айланма ҳаракат натижасида оқими чўзилиб, орқада қолган ионлар тезлатувчи оралиққа келгунча, тезлатувчи ярим давр секинлаштирувчи ярим давр билан алмашиб қолади. Бу ҳолда ионлар тезлатиш циклидан чиқади. Синхрофазотрон ва синхротронларда мана шундай фазовий нотургунлик натижасида тезлатиш жараёнига тортилган ионларнинг талай қисми камайиб қолади. Ва ниҳоят, ионларнинг тезлиги ошиб бориши билан уларнинг массалари ўсиши натижасида резонанснинг асосий шарти бузилиб боради. Бу ҳам ионларни тезлатиш жараёнида фазавий силжишига олиб келади.

Кўпроқ ионларни тезлатиш жараёнида тезлатувчи ярим давр ичида қолишини таъминлаш ***ионларнинг фазавий турғунлиги*** деб аталади. Ионларнинг фазавий турғунлиги ҳар хил тезлатгичларда турли йўллар билан ҳал қилинади. Циклотронда фазавий турғунлик, ионларни бутун тезлатиш жараёнида фақат кучланишнинг тезлатувчи ярим даври ичида сақлаш, уларни шу ярим давр ичида синъий фазавий силжишини таъминлаш йўли билан бажарилади. Бунинг учун амалда магнит ўзагининг марказида магнит майдонини резонанс учун ҳисобланган қийматидан кўпроқ, магнит четида эса, аксинча, резонанс қийматидан камроқ қилиб олинади. Бу ҳолда ион ўзакнинг марказида магнит майдони кучлироқ бўлгани учун оралиққа илгарироқ келиб, айланишлар сони ортган сари кучланишнинг амплитудадан кичик қиймати томон (амплитуда қиймати билан тезлатилаётган ион учун) силжийверади. Ион магнит майдонининг резонанс ва ҳақиқий қийматлари тенг бўлган нуқтага етганда (расмда икки эгри чизиқнинг кесишган нуқтаси) у олдинги йўналишнинг тескари томонига қараб силжийди, чунки шу нуқтадан бошлаб магнит майдонининг ҳақиқий қиймати резонанс қийматидан камроқ бўлиб, ион оралиққа ярим даврдан кечикиб кела бошлайди. Фараз қилайлик, ион тезлатувчи оралиққа кучланишнинг амплитуда қиймати вақтида чиққан бўлсин (фазасини $\varphi_1 = 0$ деб оламиз). Шартга кўра, магнит майдонининг марказдаги қиймати ҳисобланган резонанс қийматидан катта бўлганлиги учун ион кейинги айланишларида тезлатувчи оралиққа кучланиш ярим даврига нисбатан илгарироқ кела бошлайди, яъни амплитуда қийматининг чап томонига силжийди.

Ион тезланиш давомида резонанс ва ҳақиқий магнит майдонининг кесишган нуқтасига етганда орқага қайтади. Шу нуқтадан бошлаб магнит майдонининг ҳақиқий қиймати резонанс қийматидан кам бўлганлиги учун ион сўнгги радиусгача силжишда давом этиб, кучланишнинг маълум (φ_3) фазасида тезлатиш жараёни тамом бўлади. Шу йўсинда циклотронда ионлар кучланишнинг тезлатувчи ярим даври ичида синъий силжийди ёки қалқийди, бунда уларнинг фазавий турғунлиги таъминланади.

Катта тезлатгичларда ионларнинг фазавий тургунлиги Совет олими В. И. Векслер кашф этган автофазировка принципи асосида амалга оширилади.

Автофазировка принципида ионларнинг энергияси, фазаси, орбитанинг радиуси ва узунлигининг бир-бирига боғлиқлигидан фойдаланилади.

Автофазировка принципининг моҳиятини синхротонда электронларни ва фазотронда протонларни тезлатиш жараёнини қараб чиқиш билан тушунтириш мумкин. Синхротронда электронларнинг тезлигини доимий ва ёруғлик нури тезлигига тенг деб олиш мумкин. Чунки бир неча *Мэв* энергияга эга бўлган электроннинг тезлиги ёруғлик нури тезлигига шунчалик яқин-

лашиб қоладики, унга тенг деб олсак, унча катта хатога йўл қўйган бўлмаймиз.

Синхротронда магнит майдони катталигининг қийматн секин-аста ошиб боришига мувофиқ равишда электроннинг энергияси ўсиб боради. Магнит майдонининг кучайиши электрон орбитасининг радиусини, бинобарин, узунлигини камайтиради. Орбитани кичрайиши электроннинг айланиш даврини қисқартиради, демак, электрон тезлатувчи оралиққа илгарироқ, кучланишнинг қандайдир φ_1 фазасида келади. Энди φ_1 фазали электрон бошқа электронларга нисбатан ортиқча энергия олиб каттароқ радиус (яъни орбита)да айланма ҳаракатда бўлади. Лекин орбитаси катталашгани учун унинг айланиш даври ортади, демак кучланишнинг ўзгариш давридан орқада қола бошлайди ва бу ион орқага томон силжийди. Бир неча айланма ҳаракатдан кейин электрон айланиш даврининг ўзгариши тўхтагунча бошлангич фазаси (φ_2) томон силжийди. φ_2 фазада электрон кичик кучланишда тезланаётгани учун кичикроқ орбитада айланади, яъни унинг айланиш даври кучланиш давридан камайиб қолади. Электрон тезлатувчи оралиққа яна эртароқ келадиган бўлиб қолади ва айланма ҳаракат натижасида силжиб, фазаси яна φ_1 бўлиб қолади. Тезлатиш шу тарзда давом этиб, электрон бирор φ_0 фаза атрофида доимий фазада тебраниб туради. Демак, у доим тезлатувчи ярим давр ичида бўлади.

Фазотронда эса ион (протон) энергиясининг ортиши, кучланиш частотасининг секин камайиб бориши билан мос келади. Кучланиш частотасининг камайиши натижасида ион тезлатувчи оралиққа эртароқ кела бошлайди ва у кўпроқ энергия ола бошлайди, унинг айланиш даври орта бошлайди, ион кучланишнинг давридан энди орқада қола бошлайди. Ион бир неча марта айлангандан кейин φ_2 фазага қайтади ва кичик порцияда қўшимча энергия ола бошлайди. Ионнинг кичик порцияда энергия олиши, бинобарин, шу кичик энергияга мос ион массасининг релятивистик ўсишининг секинлашиши унинг айланиш даврини камайтиради. Демак, у яна кучланиш давридан кичиклашиб, фаза томон силжийди ва ҳоказо. Шу йўсинда синхротрондаги φ_1 электрон каби фазотрондаги ион ҳам φ_0 фаза атрофида доим тебраниб туради.

36-§. ЧИЗИҚЛИ РЕЗОНАНС ТЕЗЛАТГИЧЛАР

Маълумки, чизиқли резонанс тезлатгичларда доимий магнит майдони қўлланилмайди, шунинг учун ҳам тезлатилаётган ионларнинг траекторняси ёйилган бўлиб, у тўгри чизиқдан иборат.

Чизиқли тезлатгичларда тезлатишнинг асосий негизи тезлатувчи кучланишнинг частотаси билан тезлатилаётган ионнинг тезлатувчи оралиққа келиш вақти ўртасидаги мувофиқликнинг, яъни синхронизмнинг мавжудлигидадир. Бинобарин, ионнинг тезлатувчи оралиққа чиқишидан аввал ҳар бир электрод-найча-

дан ўтиши учун керак бўлган вақт юқори частотали кучланишнинг ярим даврига тенг бўлиши лозим. Бу шарт, ҳар бир конкрет тезлатгич учун ионларнинг тезланиш жараёнида олдиндан ҳисоблаиган тезлигига монанд равишда ҳар қайси электрод найчанинг узунлигини аниқлаш билан бажарилади.

Чизиқли резонанс тезлатгичларни лойиҳалаш ишининг яна бир шарти шундан иборатки, ҳар бир конкрет тезлатгич тезлатувчи кучланишнинг мутлақо аниқ бир қийматига мўлжалланган бўлиши керак. Чунки кучланишнинг қиймати ионларнинг тезлигини, демак, электрод найчаларнинг катта-кичиклигини, шу билан бирга бутун тезлатгичнинг ўлчовини ва ионларнинг сўнгги кинетик энергиясини олиш маъносида, унинг имкониятини ва қувватини аниқлайди.

Бир неча тезлатувчи электрод-найчалардан иборат чизиқли тезлатгичнинг ихтиёрий n найчасининг узунлигини топамиз. Бунинг учун n найчанинг узунлигини L_n, ионнинг шу найча ичидаги тезлигини v_n деб белгилаймиз, у ҳолда $L_n = v_n \frac{T}{2}$, ($T/2$—кучланишнинг ярим даври).

Бу тенгламадан фойдаланиш учун уни қулайроқ шаклга келтирамиз:

$$L_n = v_n \frac{T}{2} = v_n \frac{1}{2f} = v_n \frac{\lambda}{2c} = \frac{\beta_n \lambda}{2},$$

бу ерда f — кучланиш частотаси, λ — юқори частотали кучланишнинг тўлқин узунлиги, c—ёруғлик тўлқини тезлиги, $\beta_n = \frac{v_n}{c}$.

Демак,

$$L_n = \frac{\beta_n \lambda}{2}. \qquad (27)$$

Бу жуда муҳим тенглама бўлиб, чизиқли резонанс тезлатгичларда ҳар бир тезлатувчи электрод-найчанинг узунлигини, ионларнинг тезлигини кучланиш манбаи бўлган юқори частотали генераторнинг тўлқин узунлиги билан боғлайди.

Тезлатгичнинг бу асосий тенгламасини ионларнинг кинетик энергияси билан ҳам боғлаш мумкин. Агар n найчадаги ионнинг кинетик энергиясини E_n деб олсак, бу ҳолда

$$E_n = \frac{m v_n^2}{2}. \quad \text{Бундан } v_n = \left(\frac{2E_n}{m}\right)^{1/2}$$

ёки

$$\beta_n = \left(\frac{2E_n}{mc^2}\right)^{1/2}. \qquad (28)$$

Демак, (27) ва (28) га кўра

$$L_n = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{2E_n}{mc^2}\right)^{1/2}$$

ёки

$$L_n = \frac{\lambda}{2c}\left(\frac{2E_n}{m}\right)^{1/2}. \qquad (29)$$

Тезлатувчи оралиқлардан олинадиган тезланиш бир хил бўлганлиги учун йиғинди кинетик энергия

$$E_n = N\Delta E, \qquad (30)$$

бу ерда N — тезлатувчи оралиқлар сони, ΔE — ҳар бир тезлатувчи оралиқ берадиган энергия миқдори.

(29) ва (30) формулалардан $L_n = \frac{\lambda}{2c}\left(\frac{2N\Delta E}{m}\right)^{1/2}$

ёки $$E_n = \frac{2mc^2}{\lambda^2}L_n^2 \qquad (31)$$

экани келиб чиқади.

Бу ифодадан кўриниб турибдики, m, c ва λ доимий бўлганлиги учун, тезлатилаётган ионнинг тўла кинетик энергияси электрод найча узунлигининг квадратига тўғри пропорционал экан. Бошқача қилиб айтганда, чизиқли резонанс тезлатгичларда олинадиган тўла кинетик энергиянинг миқдори тезлатгичнинг умумий узунлиги билан аниқланади. Шу асосда ишловчи чизиқли резонанс тезлатгич 1928 йилда биринчи марта Видерое томонидан қурилган бўлиб, у ишқорий металлар ионларини тезлатишга мўлжалланган.

1930 йилда америкалик Слоан ва Лоуренс Видерое тезлатгичини бирмунча мукаммаллаштириб, унда симоб ионларини тезлаштирди. Слоан ва Лоуренс тезлатгичида 30 та тезлатувчи оралиқ бўлиб, ҳар бири 42 минг вольт кучланишга эга эди. Демак, сўнгги оралиқдан ўтган ионнинг энергияси $30 \times 42000 = 1260000$ *эв*, яъни 1,26 *Мэв* га тенг бўлган.

Биз кўриб чиққан Видерое ва Слоан — Лоуренс тезлатгичлари ионларни унча катта бўлмаган энергияларга қадар тезлатиш учун мўлжалланган, чунки бу тезлатгичларда ионлар тезлигининг ортиши натижасида улар массасининг релятивистик ошиб бориши ҳисобга олинмайди.

Электрон ва протонларни бир неча ўн ва юз *Мэв* энергиягача тезлатиш учун мўлжалланган чизиқли тезлатгичлар бошқача асосда ишлайди. Бу тезлатгичлар америкалик олим Алварец номи билан боғлиқ бўлиб, Алварец тезлатгичлари деб аталади. Алварец тезлатгичининг асосий ғояси қуйидагидан иборат. Металдан қилинган ичи бўш цилиндр юқори частотали кучланишнинг ташқи манбаи (генератори) билан уланса, цилиндрнинг ичида электромагнит тебранишлар ҳосил қилинади. Бунда цилиндр ичида доиравий магнит майдони ҳосил бўлиб, цилиндрнинг ўқи бўйича бу майдоннинг қиймати нолга тенг бўлиб, унинг деворида эса максимал қийматга эга бўлади. Электр майдони эса, аксинча, цилиндр ўқи бўйича максимал қийматга эга бўлиб, деворида эса нолга тенг.

Қўзғатилган электромагнит тебранишларнинг тўлқин узунлиги цилиндр радиуси r билан узвий боғлиқ бўлиб, у қуйидагича ифодаланади.

$$\lambda = 2{,}61r.$$

Цилиндр ўқи бўйича ҳосил бўлаётган электр майдонининг қиймати жуда катта бўлиши мумкин. Электр майдонининг қиймати 15—35 киловольт/*см* ва ундан ҳам кўп бўлиши мумкин. Лекин бундай электр майдони кучланганлигининг градиенти цилиндр ичидаги қолдиқ ҳавода разрядга олиб келиши мумкин. Шунинг учун одатда бундай цилиндр (резонатор) га ташқи генератордан узатилаётган кучланиш узлуксиз эмас, балки импульс равишда берилади. Қисқа вақт ичида катта қувват билан узатилаётган кучланиш цилиндр ичида электр кучланганлигининг жуда катта градиентини ҳосил қилади. Натижада вақт-вақти билан юқори кучланиш ҳосил қилингани ҳолда резонаторни таъминловчи генераторнинг сарф қилаётган ўртача қуввати нисбатан кам бўлади.

Юқорида кўрганимиздек, ҳосил бўладиган тебранишлар тўлқин узунлиги резонатор радиусига боғлиқдир. Шунинг учун кичик радиусли цилиндр резонаторларида электр майдонининг частотаси ниҳоят даражада катталашиб кетади. Бошқача қилиб айтганда, унча катта бўлмаган резонатор ўқи бўйича ҳосил бўлаётган электромагнит тебранишларнинг бир неча тўлиқ даври жойлашади. Резонатор ичида электр майдонининг тескари йўналишидаги қисмини дрейф найчалари деб аталадиган найчалар билан тезлатилаётган иондан экранласак, унда электр майдонининг ҳар бир тўлиқ даври бир миқдор тезланиш беради — биринчи ярим дарви тезлатувчи, иккинчи ярим даври дрейф найча билан экранланади. Шундай қилиб, бир цилиндр, яъни резонатор ичига бир қанча тезлатувчи оралиқ ва дрейф найчаларни жойлаб, ундан катта йигинди кинетик энергия олиш мумкин. Ҳар бир тезлатувчи оралиқ билан дрейф найчасининг узунлиги Алварец тезлатгичининг битта катагини (ячейкасини) ташкил қилади. Видерое тезлатгичида кўриб ўтганимиздек, Алварец тезлагичи битта ячейкасининг узунлигини топамиз. Юқоридаги шартларга биноан *n*-ячейканинг узунлиги

$$L_n = v_n \tau = v_n \frac{1}{f} = v_n \frac{\lambda}{c}$$

ёки

$$L_n = \beta_n \lambda. \qquad (32)$$

Ионнинг бир ячейкадан ўтишида оладиган энергиясини аниқлайлик.

Ионнинг тўлиқ энергияси, $E_T = E_0 + E_k$,
бунда E_k — унинг кинетик энергияси, E_0 — тинчликдаги энергияси ($E_0 = m_0 c^2$) ёки $mc^2 = m_0 c^2 + E_k$.

Бундан $E = mc^2 - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2$

ёки

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right).$$

Бу ифодага (32) дан β_n нинг қийматини қўйсак:

$$E_k = E_o\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{L_n^2}{\lambda^2}}}-1\right) \text{ ёки } E_k = E_o\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-L_n^2}}-1\right). \quad (33)$$

Тенгламадан кўриниб турибдики, Алварец тезлатгичида ҳам сўнгги, олиниши мумкин бўлган кинетик энергия тезлатгичнинг катта-кичиклигига боғлиқ. Чунки (33) ифодага кирган λ ва L тезлатгичнинг ўлчамини аниқлайди. Бундай тезлатгичларда олинадиган электрон ва протонларнинг энергияси бир неча ўн ва юз *Мэв* га етиб боради.

Чизиқли резонанс тезлатгичлардан олинадиган зарралар дастаси яхши фокусланган бўлиб, фойдаланишда жуда қулайдир. Хусусан, катта тезлатгичлар учун инжектор — бошланғич энергияли ионлар манбаи сифатида 50—100 *Мэв* энергия берувчи чизиқли резонанс тезлатгичлар ишлатилади.

Чизиқли резонанс тезлатгичларда (зарурият бўлганда) қўшимча тезлатувчи оралиқлар ташкил этилиб, тезлатилаётган зарраларнинг сўнгги энергиясини нисбатан осонлик билан ошириш мумкин.

37-§. ВАН-ДЕ-ГРААФ ТЕЗЛАТГИЧИ

Тезлатгичлар техникасида электростатик ёки кўпроқ Ван-де-Грааф генератори номи билан маълум бўлган тезлатгич, ҳозирги кунгача ядро физикасининг муҳим тадқиқот асбобларидан бири бўлиб қолмоқда. Ванде-Грааф генераторининг зўр томонларидан бири — ундан олинадиган тезлатилган ионлар дастасининг моноэнергетиклиги, яъни энергия жиҳатидан бир жинслилигидадир. Физик тадқиқотчи томонидан ҳар бир тезлатгич олдига қўйиладиган қатор талаблардан бири ионлар дастасининг бир жинсли бўлиши билан бирга ядро реакциясини ўрганишда энг нодир ва нозик тажрибалар бажарилишини таъминлашдир. Тезлатгичларнинг тез суратда ривожланишига қарамай, тезлатилган ионларнинг кинетик энергияси 1—2 *Мэв* ва ундан ҳам юқори бўлса-да, ҳозирги кунгача Ван-де-Грааф генераторидан бошқа, моноэнергетик ионлар дастасини берадиган тезлатгич йўқ.

Шу сабабли Ван-де Грааф тезлатгичи ҳозир ҳам асосий физикавий ускуналардан бири бўлиб қолмоқда.

Чизиқли ва аниқса, магнитли циклик резонанс тезлатгичларда ионлар дастасини тезлатиш юқори частотали кучланиш ва ўзагининг марказидан четга томон камайиб борувчи магнит майдони ёрдамида бажарилади. Бундай тезлатгичларда ионлар дастасидаги энергетик бир хиллилик 1—2% ни ташкил қилади. Бу анча катта қийматдир. Агар бу қийматни, протонни 20 *Мэв* энергиягача тезлатадиган циклотронга нисбатан олсак, унда дастадаги ионларнинг энергетик жиҳатдан ҳар хиллиги 200—

400 килоэлектрон-вольтни ташкил қилади. Демак, бундай ионлар ёрдамида бирор ядрони уйғонган ҳолатга келтирсак, бу ядронинг энергетик даражаларини камида 200—400 килоэлектрон-вольт хатолик билан аниқлаш мумкин бўлар эди. Моноэнергетик ионлар дастаси олиш масаласи асосан тезлатувчи тезлатгичлар ёрдамида ҳал қилинади. Ҳозирги кунда бундай тезлатгичлар ичида Ван-де-Грааф генераторигина ўз аҳамиятини йўқотгани йўқ. Ван-де-Грааф генераторида юқори катталикдаги доимий кучланишни олиш қатор техник қийинчиликларга олиб келди. Бундай кучланишни олишда асосий қийинчилик — кучланиш манбаи ва тезлатувчи найчаларнинг изоляцияси масаласидир. Тезлатувчи электрод найчалар юқори кучланишни ушлаши учун уларнинг ташқи сатҳида бўладиган сирғанувчи разряд ҳодисаларининг олдини олиш, генераторнинг таянч устунлари бўйича зарядни ерга оқиб ўтишини йўқотиш ва қолаверса, юқори кучланишли шар сиртидан разрядниг ерга ўтиши ва шунга ўхшаш қийинчиликлар Ван-де-Грааф генераторида истаганча катта кучланиш олишга имкон бермайди. Ван-де-Грааф тезлатгичидан ўтадиган ионларнинг кинетик энергияси 5—8 *Мэв* бўлади, баъзи мукаммаллаштирилган катта генераторларда 10—12 *Мэв* билан чекланади.

Электростатик генератор—Ван-де-Грааф тезлатгичининг ишлаши асосида зарядли заррани электр майдонида тўғридан-тўғри тезлатиш усули ётади. Агар m массага ва e зарядга эга бўлган зарра E кучланганликка эга бўлган бир жинсли электр майдонига жойлашган бўлса, бу заррага $f = eE$ куч таъсир қилади.

Зарра f куч таъсирида U потенциаллар айирмасидан ўтиб, E_k кинетик энергияни олади:

$$E_k = eU$$

ёки

$$eU = \frac{mv^2}{2}; \qquad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Кўриниб турибдики, зарранинг оладиган кинетик энергияси унинг заряд миқдори ва потенциаллар айирмасининг миқдори билан аниқланар экан. Тезлатилган нон дастасидаги ионлар энергиясининг турлича бўлиши потенциаллар айирмаси (U) нинг қандай даражада стабилизация қилинганлигига (одатда U миқдорини 0,1–0,2% гача стабиллаш мумкин) боғлиқ бўлади. Демак, Ван-де-Грааф тезлатгичидан олинган ионлар дастасининг монохроматиклиги бошқа тезлатгичларникига нисбатан деярли 10 марта каттадир.

Доимий кучланишдан бевосита ва бир марта фойдаланилувчи тезлатгичларда, жумладан Ван-де-Грааф генераторида ҳам ионларнинг тўла энергияси уларнинг массасига боғлиқ эмас. Бу ҳолда тезлатгич фақат бир хил ионларни тезлатишга мўлжалланган бўлиб қолмай, балки унда электрондан тортиб, оғир элементларнинг ионларигача тезлатиш мумкин. Бунинг учун тез-

латгичга деярли ҳеч қандай конструктив ўзгартиришлар (албатта, ионлар манбаини алмаштиришдан ташқари) киритишнинг ҳожати бўлмайди. Агар ионлар манбаидан бир вақтда ҳар хил ионлар чиқаётган бўлса (масалан, водороднинг атомар ва молекуляр ҳолатдаги ионлари), улар бир хил кинетик энергия олади ва тезланишнинг охирида махсус магнитлар ёрдамида бир-биридан ажратиб олиб, улардан алоҳида-алоҳида фойдаланиш мумкин. Доимий кучланишнинг қийматини аста-секин ўзгартириш билан Ван-де-Граафда тезлатилаётган ионларнинг кинетик энергиясини амалда энг минимал қийматдан максимал қийматгача ўзгартириш мумкин. Илмий-тадқиқот ишларида бу жуда зарур ва ажойиб имкониятдир.

38-§. ЦИКЛОТРОН

Циклотронда Менделеев жадвалининг нхтнёрий катагидаги элемент ионларини тезлатиш мумкин бўлса ҳам, амалда улар маълум хил ионларни тезлатиш учун мўлжалланган. Ҳозир 4—25 *Мэв* энергияли ионларни берувчи юзга яқин циклотрон ишлаб турган бўлса, уларнинг 40 дан ортиқроғи дейтонларни тезлатишга, 10 тачаси протонларни, 6 таси кўп зарядли ионларни тезлатишга мўлжалланган бўлиб, қолганлари эса хилма-хил заррачаларни тезлатишда фойдаланилади. Циклотронда ионнинг асосий ҳаракат тенгламаси

$$\frac{mv}{R} = \frac{ZeH}{c}$$ бўлиб, ионнинг тезлиги $v = \frac{ZeHR}{mc}$.

Тезлик v ни кинетик энергия формуласига қўямиз;

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\dfrac{Z^2e^2H^2R^2}{m^2c^2}}{2} = \frac{Z^2e^2R^2H^2}{2mc^2}, \qquad (34)$$

бу ерда H — магнит майдони, R — сўнгги орбитанинг радиуси Ze — ион заряди, m — масса, c — ёруғлик тезлиги.

Агар (34) формулага доимий параметрларнинг қийматини қўйсак, унда циклотронда тезлатилаётган ионларнинг кинетик энергиясини аниқловчи ярим эмпирик ифодани оламиз:

$$E_k = 0{,}48\,(HR)^2\frac{Z^2}{m}.$$

Ҳар бир конкрет циклотрон учун R (асосий магнит радиуси) маълум бўлган ҳолда тезлатилиши лозим бўлган ион учун Z/m ни аниқлаб, керакли энергиянинг қийматини (34) га қўйсак, шу мўлжалланган энергияли ионни олиш учун керак бўлган магнит майдони H ни топамиз. Юқори кучланиш берувчи генераторнинг частотасини топиш учун H ни зарранинг айланиш частотаси формуласига қўямиз:

$$f = \frac{eH}{2\pi mc}$$

Частота учун ишлатишга осонроқ ифодаларни келтирганимиз маъқул. Протон учун $f = 1{,}52\ H$; дейтон учун $f = 0{,}76\ H$.

Мўлжалланган энергия учун магнит майдони H, тезлатувчи кучланиш частотаси f ни аниқлаб, ҳар бир конкрет циклотронни танлаган элемент ионини тезлатишга тайёрлаш мумкин.

Аввал айтиб ўтганимиздек, циклотронда тезлатилган ионнинг энергияси маълум миқдор билан чекланган бўлади.

Шу масалани батафсил кўриб чиқамиз. Ионлар тезлиги ортиши билан массасининг релятивистик ўсиши натижасида уларнинг айланиш даври ошиб боради. Демак, резонанс тезланишнинг асосий шарти — кучланиш даври билан ионнинг айланиш даври ўртасидаги тенглик бузилади. Бунга қўшимча, ионларнинг орбитал тургунлигини таъминлаш учун сунъий равишда магнит майдонини марказидан четига камайиб борадиган қилиш резонанс шартини яна бузади.

Резонанс шартининг бундай икки марта бузилишига қарамасдан, циклотронда магнит майдонининг қийматини ҳисобланган резонанс қийматидан ошиқроқ олиб, ионнинг фазавий сунъий силжишини амалга ошириш билан кучланишни тезлатувчи ярим давр ичида олиб қолиш мумкин. Циклотронда шундай чораларни кўрмоқ лозимки, бунда тезлатувчи оралиққа тушган ионлар кучланиш ярим даврининг ҳамма фазасида эмас, балки унинг амплитуда қийматига яқин бўлган фазада бошланғич тезланиш олсин, у ҳолда ионларнинг фазавий силжиши кам бўлиб, бир оз айланма ҳаракатланиб, сўнгги радиусга етиб олади. Шунинг учун ҳам реал циклотронларда тезлатувчи ярим даврининг ҳаммаси эмас, балки унинг 15—20° кенглигидан фойдаланилади. Умуман, циклотронда олиниши мумкин бўлган энергиянинг чекланиши қуйидаги формула билан аниқланади:

$$E_k = 1{,}4\,(2U_a mZe \sin\varphi)^{1/3}\ (Мэв),$$

бу ерда m — ион массаси, U_a — кучланишнинг амплитуда қиймати, φ — ионнинг бошланғич фазаси. Циклотроида тезлатувчи кучланишнинг қиймати 230—240 *кв* бўлади. Тахминий ҳисоблашлар учун соддароқ бўлган қуйидаги формулани тавсия этиш мумкин:

$$E_k = 0{,}9\sqrt{Zm}\cdot\sqrt{U_a}.$$

Тезлатувчи камерада ҳам циклотроида тезлатилган ионлар дастасидан фойдаланиш мумкин. Лекин бунда баъзи ионлар тезлатиш жараёнида идеал фокуслашнинг йўқлиги сабабли дуантлар деворига тегиши натижасида уриб чиқарилаётган нейтрон ва гамма-нурлари нишондан ядро реакцияси натижасида бевосита ажралаётган иккиламчи зарраларга қўшилиб, ядронинг парчаланиш жараёнини ўрганишни, иккиламчи зарраларни ажратиб олишни қийинлаштиради. Шунинг учун ҳам ионлар дастасини тезлатувчи камерадан чиқариб, махсус тажриба-тадқиқот кабиналарига узатилади. Бу ҳолда ядро реакциясини бевосита кузатиш, ундаги фойдали маълумотни ажратиб олиш осон-

лашади. Ион дастасини камерадан чиқариш дефлектор ёки бурувчи система деб аталувчи махсус электрод (24- расм) ёрдамида бажарилади.

Дефлектор дуантдан изолятор ёрдамида ажратилган бўлиб, унинг потенциали дуант потенциалига боғлиқ эмас. Дефлекторга 50—80 минг вольт манфий потенциал берилади. Ион дастаси сўнгги айланага чиқиб, дефлектор яқинида ўтаётганда, унинг юқори потенциали таъсирида тортилади ва зарранинг айланма траекторияси тўғриланади.

Ионларнинг дефлектор орасидан ўтиши (кучланиш қиймати, дефлектор электродларининг ўрнатилиши ва ҳоказо) шундай ҳисобланганки, улар дефлектор электродларига ўтириб қолишга улгурмасдан, махсус тешик орқали ион ўтказувчи трубага чиқарилади. Одатда, ташқарига чиқарилган ионлар дастаси махсус бурувчи ва фокусловчи магнитлар ёрдамида камерадан 10—15 *м* ва ундан ҳам кўп масофада жойлашган тажриба-тадқиқот кабиналарига узатилади. Ҳамма тезлатгичлардагидек, циклотронда ҳам ион дастаси токини ўлчаб бориш зарур. Токни ўлчаш жуда осон. Агар ион дастаси келиб урилаётган нишон гальванометр орқали ерга уланса, у ҳолда снмда ток ҳосил бўлади. Ток қийматини гальванометр стрелкасининг бурилишига қараб аниқланади.

Циклотронда ядро реакциясини ўрганиш билан бир қаторда, халқ хўжалиги, фан ва техника эҳтиёжи учун муҳим бўлган айрим сунъий радиоактив элементлар (изотоплар)ни олиш мумкин. Албатта, сунъий радиоактив элемеитларнинг кўпчилиги ҳозирги кунда атом реакторида, кучли нейтрон оқими таъсири остида олинади. Лекин айрим сунъий радиоактив элементлар борки, уларни фақат циклотронда олиш мумкин. Ундан ташқари, циклотрон ионлари дастасидан айрим амалий мақсадларда ҳам фойдаланиш мумкин.

Масалан, зарядли зарраларнинг кучли оқими таъсирида айрим жисмларнинг физик-химиявий, электр ва бошқа хусусиятларининг ўзгаришини ўрганиш мумкин.

39- §. БЕТАТРОН

Электронларни бетатронда тезлатиш электромагнит индукцияси ҳодисасидан фойдаланишга асосланган. Катталиги ўзгариб бораётган магнит майдони атрофида ўзгарувчан электр майдони ҳосил бўлади. Бу майдоннинг куч чизиқлари индукция бераётган ўзгарувчан магнит оқими атрофида ёпиқ контур ташкил қилади. Бу хилдаги тезлатгичнинг ажойиб хусусияти шундаки, қуйида келтириладиган шарт бажарилганда, биргина магнитдан ҳам электронларни тезлатиш учун, ҳам уларни бошқариш, яъни бир орбитада сақлаб туриш учун фойдаланиш мумкин.

Магнит оқими атрофида ҳосил бўладиган ўзгарувчан электр майдони (E) тезлатилиши лозим бўлган заррага F куч билан таъсир қилади:

$$F = eE.$$

Электрон доимий бир орбитада бўлсин учун худди циклотрондагига ўхшаш қуйидаги шарт бажарилиши керак:

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{evH}{c} \text{ ёки } mv = \frac{eHR}{c}.$$

Назарий ҳисоблашлар бетатроннинг ишлаш асосларини аниқлайдиган ажойиб натижага олиб келади, яъни орбита ичидаги магнит ўзаги куч чизиқларининг ўсиш тезлиги ўзак атрофидаги бошқарувчи магнит майдони ўсиш тезлигидан икки баробар катта бўлиши керак. Бошқача қилиб айтганда, ўзакнинг магнит майдони бир миқдор ортишига орбитадаги магнит майдонининг икки марта ортиши тўғри келиши керак.

Электрон айлана бўйлаб ҳаракатланар экан, магнит майдони таъсирида маълум энергия олади ва тезланади. Магнит майдонининг оқими (Φ) тезлатиш жараёнида катталашиб, Φ_1 дан Φ_2 гача ўзгариши натижасида электрон энергияси E_1 дан E_2 гача ошди, дейлик. У ҳолда, қуйидаги муносабат ўринли бўлади:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \frac{2\pi}{\omega}(E_2 - E_1).$$

Электрон тезлиги нисбатан кичик энергиядаёқ ёруғлик тезлиги (c) га деярли тенг бўлганлиги сабабли, электроннинг айланиш частотасини ифодаловчи ω ни доимий қийматга тенг дейиш мумкин.

Агар $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$, $\frac{2\pi}{\omega} = K$ ва $E_2 - E_1 = \Delta E$ деб белгиласак, у ҳолда $\Delta\Phi = K\Delta E$ бўлади. Демак, магнит майдони оқимининг ўзгаришига электрон энергиясининг маълум қийматга ортиши тўғри келади ва, аксинча. Бетатронда тезлатилган электронларнинг энергияси бир неча 100 *Мэв* гача етказилди. Ҳозирги кунда бетатронлар электроннинг турли хил энергиясига мўлжаллаб қурилади ва улар халқ хўжалигининг, фан ва техниканинг турли тармоқларида ишлатилади. Бетатрондан амалий фойдаланишда, қўйилган вазифанинг талабига мувофиқ, бевосита электронларнинг ўзи билан нурлатиш ёки электронларни секинлаштирганда ҳосил бўладиган гамма-нурланишдан фойдаланиш мумкин.

Тезлатилган электронлар ёки гамма-нурланиш ядро физикасида, тадқиқот ишларида, медицинада нурланиш терапияси ва диагностикада, техникада дефектоскопия мақсадларида ишлатилади. Кейинги вақтларда катта энергияга эга бўлган электронларни кескин секинлаштириб олинадиган гамма-нурланишдан моддалардаги жуда оз миқдордаги «бегона» бирикмаларни радиоактивация йўли билан анализ қилишда муваффақиятли фойдаланилмоқда. Айниқса, 25 *Мэв* энергияга эга бўлган элек-

трон тезлатгичлари бундай ишларда анча қўл келмоқда. Умуман, фан ва техника ривожланиб бетатрондан амалий фойдаланиш усули ва йўллари такомиллашган сари, унга бўлган эҳтиёж, бинобарин, ундан олинадиган фойда сўзсиз ошиб боради.

40 §. КУЧЛИ ФОКУСЛАШГА АСОСЛАНГАН ТЕЗЛАТГИЧЛАР

Юқорида кўриб ўтилган тезлатгичлар одатда кучсиз фокуслашга асосланган тезлатгичлар деб юритилади. Бу тезлатгичларда магнит майдонининг катталиги қанча камайиб борса, уларда фокуслаш самараси шунча яхши бўлади. Лекин магнит майдони катталигининг ҳаддан ташқари камайиб кетиши ҳам ярамайди, чунки бу ҳолда орбитал турғунлик яхши таъминланган ҳолда ионларнинг фазавий турғунлиги бузилиб кетган бўлур эди. Ундан ташқари ионларни магнит майдони билан фокуслаш ёки ўрта текисликдан чиқиб кетган ионларга ташқи куч билан таъсир қилиш, бу ионларни тебраниш ҳаракатига олиб келади. Ионларга магнит майдонининг таъсирини эластик жисмга ташқи куч билан таъсир қилишга ўхшатиш мумкин. Агар биз эластик жисмга маълум куч билан таъсир кўрсатсак, жисм деформацияланиши мумкин, куч олингандан кейин эса жисм яна олдинги ҳолатига, шаклига келишга ҳаракат қилади. Жисмни олдинги шаклига келишига йўл қўймаслик учун, ташқи куч унга узлуксиз равишда таъсир қилиб туриши керак. Худди шунга ўхшаш, ҳаракатдаги ионга ташқи куч, яъни магнит куч чизиқлари таъсир қилганида ионлар ҳам бу кучларга нисбатан тескари йўналишда таъсир кўрсатади. Бундай ўзаро таъсир натижасида ионлар эркин тебранма ҳаракат қила бошлайдилар. Демак, кучсиз фокусли тезлатгичларда ионлар фақат айланма ҳаракатда бўлмасдан, балки радиал ва вертикал фокуслаш натижасида радиал ва вертикал эркин тебранишда бўлар экан. Бу эркин тебраниш ҳаракатларининг частотаси ва амплитудаси, фокуслаш таъсир кучи, яъни магнит майдонининг камайиши билан аниқланади. Ионларнинг радиал ва вертикал текисликда катта амплитуда билан эркин тебранишининг мавжудлиги магнит ўзаклари орасидаги масофани, бошқача қилиб айтганда, магнит апертурасини мумкин қадар кичиклаштиришга имкон бермайди. Маълумки, магнит апертураси қанча катта бўлса, ундан олинадиган магнит кучланганлиги шунча кичик бўлади ва, аксинча, магнит токининг манбаи бўлган генераторнинг сарф қилаётган қуввати ўзгармагани ҳолда, магнит апертурасини кичрайтирсак, магнит кучланганлигининг қиймати анча ошади. Демак, қанча кичик апертуралик магнит ишлатилса, тезлатгичнинг таннархи шунчалик арзонлашади. Аммо кучсиз фокуслашга асосланган тезлатгичларда ионларнинг эркин тебранма ҳаракат амплитудаси катта бўлганлиги сабабли кичик қий-

матли магнит кучланишини олиш учун катта апертуралик катта магнитларни ишлатишга тўғри келади. Бундан ташқари, бундай тезлатгичларда резонанс шартининг икки марта бузилиши натижасида ионлар катта фазавий силжишда бўлади. Ниҳоят, юқорида кўриб ўтган сабаблар кучсиз фокуслашга асосланган тезлатгичларда юқори энергияли ионлар оқимини олишни чеклаб қўяди. Лекин, магнит марказидан четига томон камаювчи эмас, балки ўсиб борувчи магнит майдонидан фойдаланилса, резонанс шарти бажарилган бўлур эди, аммо бу ҳолда ионларни ўрта текисликка фокуслаш ўрнига, аксинча дефокуслаш ҳоли юз беради, чунки магнит куч чизиқлари ботиқ эгри шаклда бўлади. Демак, магнит майдонининг оддий ўсиб бориши қўйилган вазифани ҳал қилишга қодир эмас. Шунинг учун қандайдир янги принципни топмоқ лозим бўлиб қолди.

1950 йилда америкалик олимлар Снайдер, Ливингстон ва Курантлар кучли фокуслаш асосларини исботлаб чиқишди. Кучли фокуслаш асосининг моҳияти геометрик оптиканинг маълум принципларини амалда татбиқ қилишнинг худди ўзи бўлиб чиқди. Маълумки, иккита оптик линза, қандай тартибда туришидан қатъи назар, умумий фокус масофасига эгадир. Агар иккала линза ўртасидаги масофа d бўлса, умумий фокус масофа F учун қуйидаги ифода ўринлидир:

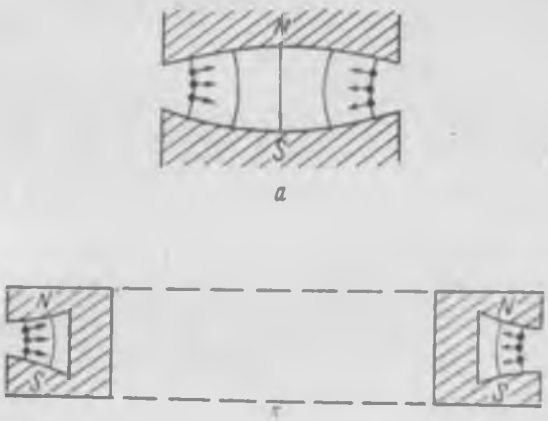
$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}-\frac{d}{f_1 f_2}.$$

Агар f_1 ва f_2 (линзанинг фокус масофаси) ўзаро тенг бўлса (линзанинг биринчиси йиғувчи, иккинчиси эса тарқатувчи), умумий фокус масофаси $F=\frac{f^2}{d}$ бўлади. Бундай система йиғувчидир. Бу физик ҳодиса қуйидагича тушунтирилади. Нурнинг ҳар бир линзадан бурчакли оғиши шу нурнинг система ўқидан узоқ ёки яқинлигига боғлиқ. Нур система ўқидан қанча узоқдан ўтса, унинг бурчакли оғиши линзадан ўтишда шунча катта бўлади ва, аксинча. Шунинг учун ҳам йиғувчи линзадан ўтаётган нурнинг оғиш бурчаги сочувчи линзадан ўтгандаги оғиш бурчагига нисбатан доим катта бўлади.

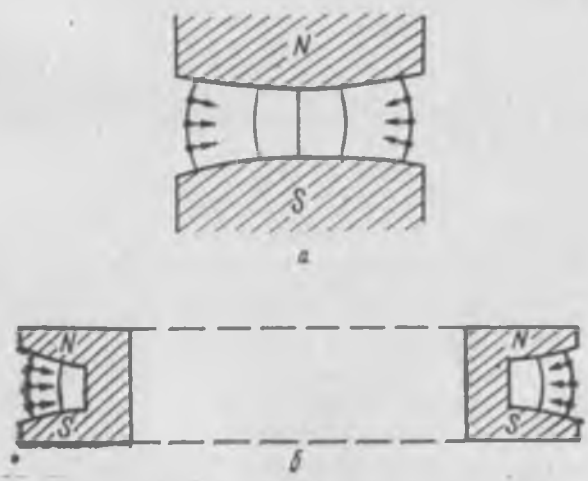
Линзалар қандай тартибда жойлашган бўлмасин, система бутун ҳолатда йиғувчи бўлиб хизмат қилади.

Бу принципни тезлатгичларга татбиқ қилиб кўрайлик. Тезлатилаётган нон йўлидаги бир магнит фокусловчи, иккинчиси эса дефокусловчи бўлса, ион иккала магнитдан ўтгандан кейин фокусланган бўлади, чунки иккала магнитдан ўтаётган ионга таъсир натижаси фокуслаш фойдасига бўлади. Ҳалқасимон катта тезлатгичларда худди шундай қилинади. Нон йўлида ҳалқа бўйича жуфт-жуфт жойлашган магнитларнинг бирида ўзагининг четига қараб магнит майдонини кескин камайиб (зўр фокусловчи, 27-расм), иккинчисида кескин кўпайиб боради (зўр дефокусловчи, 28-расм), натижа кучли фокуслаш билан якунланади.

Бундай магнитларда магнит майдонининг ўзгаришн масофа бўйича кескин бўлганлиги учун, фокусловчи кучларнинг катталиги ҳам анча катта. Шунинг учун ҳам бундай кучли фокуслашда жуфт магнитлардан ўтган ионларнинг эркин тебранма ҳаракатининг амплитудаси анча кичик бўлади.



27- расм. Вертикал—фокусловчи кучлар йўналиши (*а*—циклотрон; *б* — синхрофазотрон).



28- расм. Вертикал—дефокусловчи кучларнинг йўналиши.

Демак, бундай жуфт кучли фокусловчи магнитлар сифатида апертураси кичик бўлган магнитлардан фойдаланиш мумкин. Бундай усул билан фокуслаш кучли фокуслаш деб аталади. Кучли фокусловчи жуфт магнитлар қўлланилган тезлатгичлар эса — кучли фокусли тезлатгичлар деб аталади.

Циклотрон ҳам кучли фокусли бўлиши мумкин. Бу ҳолда циклотрон магнитининг майдони азимут бўйича катта ва кичик қийматга эга бўлиши керак.

41-§. АЗИМУТ БЎЙИЧА ЎЗГАРУВЧАН МАГНИТ МАЙДОНЛИ ЦИКЛОТРОН

Циклотронда резонанс шартининг бажарилиши $\omega = \frac{eH}{mc}$ ифодасидаги $\frac{H}{m}$ нисбатнинг доимийлиги билан аниқланади. Тезланиш жараёнида ионнинг тезлиги ошиб бориши билан унинг массаси ҳам релятивистик ўсиб боради. Демак, масса ўсиши бизга боғлиқ эмас, биз уни бошқара олмаймиз. Масса ўсишини биз фақат олдиндан ҳисоблаб ёки амалда, бевосита бўлмаса ҳам, кузатиб боришимиз мумкин, холос. Резонанс $\frac{H}{m}$ нисбатнинг доимийлиги бажарилганидан, m — массанинг ўсишига мувофиқ равишда H — магнит майдонини ҳам радиус бўйлаб ошириб бормоғимиз лозим. Ана шу ҳолдагина $\frac{H}{m}$ нисбат доимийлиги таъминланиб, тезлатиш жараёнида ионлар айланиш даври билан тезлатувчи кучланишнинг ўзгариш даври ўртасидаги резонанс, яъни синхронлик сақланади. Хўш, магнит майдони қийматининг радиус бўйлаб ошиб бориши қандай тартибда, қандай қонуниятга бўйсунмоғи керак?

Табиийки, буни нисбийлик назариясининг асосий хулосаларига таянган ҳолда, массанинг ўсиб боришини олдиндан ҳисоблаб олиш йўли билан аниқлаш мумкин. Нисбийлик назариясига кўра, маълум тезликка эга бўлган ихтиёрий зарра тинч ҳолатдаги массаси (m_0) дан каттароқ массага эга бўлади.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx m_0\left(1 + \frac{1}{2}\beta^2 + \dots\right). \qquad (35)$$

Циклотронда ионлар тезлиги унча катта бўлмаганлигидан ($v \ll c$, яъни $\beta = \frac{v}{c} \ll 1$) (35) даги учинчи ва сўнгги қадлар жуда ҳам кичик сонлардир. Шунинг учун

$$m = m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right).$$

Бу ерда ион тезлиги v ни кучланиш даври T билан ифодаласак, яъни $v = \frac{2\pi R}{T}$ десак, масса (m) учун янги ифода келиб чиқади:

$$m = m_0\left(1 + \frac{2\pi^2 R^2}{c^2 T^2}\right) = m_0(1 + bR^2). \qquad (36)$$

бу ерда $b = \frac{2\pi^2}{c^2 T^2} = \text{const}$.

Сўнгги ифода тезлатиш жараёнида ион массасининг ўсишини аниқлайди. Демак, $\frac{H}{m}$ нисбатнинг доимийлигини таъминлаш учун магнит майдонининг радиус бўйлаб ўсиши ҳам (36) кўринишида бажарилиши лозим, яъни

$$H = H_0(1 + bR^2),$$

бу ерда H_0 — магнит майдонининг марказдаги қиймати. Бу ифодага кўра, магнит майдони радиус бўйлаб марказдан четга томон квадратик қонун — парабола бўйича ўсиб бориши керак. Лекин магнит майдонининг бундай ўсиб бориши фокуслаш шартига зид-ку? Бу зидликни бартараф қилишда кучли фокуслаш принципи ёрдамга келади.

Циклотронда кучли фокуслаш принципини 1938 йилда Д. Томас тавсия қилган шаклда қўлланилади. Кучли фокусли циклотронда магнит ўзакларининг қутб сатҳлари текис бўлмай, балки азимут бўйича маълум олдинма-кейинликда баланд ва паст бўлади. Қутблар орасидан айланма бўйича ўтилганда, улар орасидаги масофа бир камайиб, бир кўпайиб ўзгаради. Табиийки, азимут бўйича бир қутбнинг бўртиб чиққан қисми иккинчисининг ҳам бўртиб чиққан қисмига, чуқурлик қисми чуқурлик қисмига тўғри келади.

Қутблар орасидаги масофанинг ўзгаришига қараб, магнит майдонининг қиймати ўзгаради. Одатда циклотронда кучли фокуслаш принципи мавжуд бўлсин учун азимут ва радиус бўйлаб ўзгараётган магнит майдони олинади.

Бундай майдон қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$H(R,\ \varphi) = H_0(1 - aR\cos p\varphi + bR^2)$$

(a ва b — доимий сонлар, p — азимут бўйлаб магнит майдонининг ўзгариш сони, φ — азимут бурчаги). Агар азимут бўйича магнит майдонининг ўртача қийматини олсак, тенгламадаги иккинчи ҳад тушиб қолади, чунки косинуснинг бутун сон, яъни p дан олинган ўрта қиймати нолга тенгдир.

Қутб сатҳлари нотекис шаклда бўлган магнит майдонида айланма ҳаракат қилаётган ионларни кучли фокуслаш билан бир қаторда, резонанс шартини бажариш учун магнит майдонининг радиус бўйлаб, ион массасининг релятивистик ортишига мос равишда ўсиб бориши ҳам таъминланади.

Мана шу асосда магнит майдони азимут бўйича ўзгарувчи бир неча циклотрон ҳозирги кунда илмий лабораториялар хизматида ишлаб турибди. Бундай циклотронларда ионлар энергияси 100—200 *Мэв* гача кўтарилиб, тезлатилган ионлар дастасини интенсивлиги эса деярлик камаймайди. Лекин бундай циклотронлар анча мураккаб бўлиб, ишлатилиши оддий циклотронларникидан анча қийиндир.

Циклотронда тезлатилаётан ионларнинг сўнгги кинетик энергиясини яна ҳам оширишга ионларнинг фазавий силжиши чек қўяди. Агар ионларнинг фазавий силжишига нисбатан бирор чора кўрилса, у ҳолда ионларнинг сўнгги кинетик энергиясини оширишга имкон яратилади. Тезлиги ошган ионнинг массаси релятивистик ортиши натижасида унинг айланиш частотаси камая боради, кучланиш частотаси билан бўлган синхронлик бузилади, пировардида ион тезлатиш циклидан чиқиб кетади. Ионни тезлатиш жараёнида сақлаб қолиш учун генератор частотасини ионнинг айланиш частотасига мос равишда камайтириб борилса, икки частота ўртасидаги резонанс сақланади ва ионни тезлатиш жараёни давом этаверади. Фазотронда кучланиш ва ионнинг айланиш частотаси ўртасида тенглик доим таъминланган бўлса, тезлатиш жараёнини узайтириш, яъни тезлатиш радиусини катталаштириш мумкин. Бошқача қилиб айтганда, фазотронда магнит диаметрини циклотрондаги магнит диаметридан анча катта қилиш мумкин, деган сўздир. Фазотрон ташқи кўринишига кўра циклотрондан деярли фарқ қилмайди. Масалан, Москва яқинидаги Дубна шаҳрида ишлаб турган, протонни 660 *Мэв* энергиягача тезлатишга мўлжалланган фазотрон магнитнинг диаметри 6 метрга тенг бўлиб, умумий оғирлиги 7 минг тоннадан ошиқроқдир.

Ионларни фокуслаш учун фазотронда ҳам циклотрондагига ўхшаш, магнит майдони марказидан четига томон камайиб боради. Агар циклотронда бу камайиш магнит четига бориб 1—2% ни ташкил қилса, фазотронда бу миқдор 3—5% гача етади. Магнит майдонининг бундай камайиб бориши ҳам частоталар ўртасидаги синхронликни бузганлиги учун кучланиш частотасини ҳам мос равишда ўзгартириш зарур.

Фазотронда бир тезлатиш цикли учун кучланиш частотасининг камайиб бориш миқдорини ёки частотанинг ўзгариш диапазонини аниқлайлик.

Доиравий частота $\omega = \frac{eH}{mc}$. Иккинчи томондан $E = mc^2$ ёки $m = \frac{E}{c^2}$, бунда e — ион заряди, H — магнит майдон кучланганлиги, m — зарра массаси, c — ёруғлик тезлиги.

Маълумки, тезлатилган ионнинг тўлиқ энергияси (E) унинг кинетик (E_k) ва тинчликдаги массасига тўғри келадиган (E_0) энергияларининг йиғиндисига тенг:

$$E = E_k + E_0.$$

Бу қийматларни доиравий частота ифодасига қўйсак,

$$\omega = \frac{eHc}{E} = \frac{eHc}{E_k + E_0}$$ бўлади.

Агар бу тенгламани частота учун ёзсак,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{eHc}{2\pi(E_k + E_0)}$$

ёки

$$f = \frac{eHc}{2\pi E_0 \left(\frac{E_k}{E_0} + 1\right)}$$

эканини топамиз.

Агар бу ифодадаги доимий катталикларнинг сон қийматини қўйсак, протон учун

$$f = \frac{1{,}52\ H}{\frac{E_k}{E_0} + 1},$$

дейтон учун эса,

$$f = \frac{0{,}76\ H}{\frac{E_k}{E_0} + 1}$$

қийматларни оламиз. Охирги икки тенглама циклотрондаги ионнинг айланиш частотаси ифодасидан $\frac{E_k}{E_0}$ ҳади билан фарқ қилади.

Бу икки тенгламадан қуйидаги хулоса келиб чиқади: фазотронда кучланиш частотасининг ўзгариш диапазони тезлатилган ионнинг сўнгги энергияси ва магнит майдонининг камайиш миқдори билан аниқланади. Бу хулосани яхшироқ тасаввур қилиш учун бир мисол келтирамиз. Фараз қилайлик, магнит майдони марказдан четигача 20 килоэрстеддан 19 килоэрстедгача камайган бўлсин, яъни камайиш миқдори 5% ни ташкил қилсин. Протоннинг сўнгги кинетик энергияси 600 *Мэв* га тенг бўлсин. Бу қийматларни протон учун чиқарилган частота формуласига қўямиз. У ҳолда, кучланиш частотаси

$$f_б = \frac{1{,}52\ H}{E_k/E_0 + 1} = \frac{1{,}52 \cdot 20}{0{,}938 + 1} \approx 30{,}4\ \textit{мгц}$$ дан,

$$f_c = \frac{1{,}52 \cdot 19}{0{,}64 + 1} = \frac{28{,}88}{1{,}64} \approx 17{,}6\ \textit{мгц}$$ гача камаяр экан.

Частотани ўзгартириш бевосита фазотроннинг дуантлар контуридаги ўзгарувчан конденсатор ёрдамида бажарилади.

Энди дуантлар ўртасидаги тезлатувчи оралиққа берилиши лозим бўлган кучланиш катталигини аниқлаймиз. Агар частотани 30,4 *мгц* дан 17,6 *мгц* гача ўзгаришида протон 600 *Мэв* кинетик энергия олса, протонни шу энергиягача тезлатиш учун тезлатувчи оралиқда кучланиш қанча бўлиши керак?

Одатда, частотанинг $f_б$ дан f_c гача ўзгаришига кетган вақт тахминан 10^{-2} *сек*. Шу вақт ичида протон 600 *Мэв* кинетик энергия олади. Бир секундда эса протоннинг энергияси

6×10^8 *эв*/10^{-2} *сек* $= 6 \cdot 10^{10}$ *эв*/*сек* бўлади. Агар ўртача частота 24 *мгц* бўлса, у ҳолда протоннинг бир айланиш даври

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{1}{2{,}4 \cdot 10^7} = 0{,}41 \cdot 10^{-7} = 4{,}1 \cdot 10^{-8} \text{ сек}.$$

Демак, протоннинг ҳар бир айланишидан кейинги энергияси $6 \cdot 10^{10}$ *эв*/*сек* $\times 4{,}1 \times 10^{-8}$ *сек* $= 24{,}6 \times 10^2$ *эв* $= 2460$ *эв* га ортади, ёки протон ҳар бир айланишдан кейин 2460 *эв* га тенг қўшимча энергия олар экан. Бу жуда муҳим хулоса. Протонларни 600 *Мэв* энергиягача тезлатиш учун дуантлар ўртасида 2460 *в* ёки 2,46 *кв* кучланиш кифоя қилар экан (агар протонларнинг бошланғич фазаси тезлатувчи ярим даврнинг амплитуда қийматида эмас, балки унинг ярим қийматида, яъни 45° бўлса). Борди-ю, протон тезлатувчи оралиққа ярим даврнинг амплитуда қийматида чиққан бўлса, унда кучланишнинг қийматини яна икки марта 1,23 киловольтгача камайтирса бўлади. Чунки, протон айлана бўйича бир марта айланганида тезлатувчи оралиқдан 2 марта ўтади. Циклотронда дуантлар орасидаги потенциаллар айирмаси 230—240 киловольтга етганда, фазотронда тезлатувчи кучланишнинг қиймати 1,5—2 киловольт атрофида бўлар экан. Шунинг учун ҳам фазотронда, ионлар тезлатувчи оралиқдан ҳар бир ўринда кам миқдорда энергия олганлиги сабабли, уларнинг айланма орбиталари зич жойлашган бўлади.

43-§. СИНХРОТРОН

Бетатронда магнит майдони электронни ҳам тезлатиш, ҳам бошқариш, яъни ўзгармас бир орбитада сақлаш учун хизмат қилишини кўрган эдик. Қизиғи шундаки, магнит ўзагининг ўрта қисми ҳосил қилаётган доиравий электр майдони тезлатувчи вазифасини ўтаса, четки қисми (магнит майдонининг сочилиш зонаси) электронларни бир орбитада ушлаб туради. Агар электронни бир орбитада ушлаб тураднган четки қисмини сақлаб қолсак-да, электр майдони ҳосил қилинадиган ўзакнинг ўрта қисмини олиб ташлаб, уни тезлатувчи дрейф-электрод-трубкалар билан алмаштирсак бўлмасмикин? Яхлит магнит ўзагини ҳалқа бўйича жойлашган кичик магнитлар билан алмаштирсак, улар электронлар орбитасининг ўзгармаслигини таъминларди, тезлатиш эса ҳалқа бўйича қўйилган бир нечта электрод-трубкалар ёрдамида бажариларди. Синхротонда электронларни юқори энергиягача тезлатишда ана шу принципдан фойдаланилади.

Тезлатиш жараёнида электрон тезлигини ўзгармас деб ҳисоблаш мумкин бўлганлиги учун тезлатувчи кучланиш частотаси ўзгармайди. Магнит майдонининг қиймати электрон энергиясининг ўсишига мос равишда ортади. Магнит майдони мўлжалланган максимум қийматга етганда, тезлатиш цикли тугайди. Шу максимум майдонда электрон олган энергияси унинг тезлатгичдаги сўнгги энергияси бўлиб қолади.

Худди бетатрондаги сингари резонанс шартини ўзгармайдиган қилиб сақлаб қолиш учун магнит майдони қийматининг ўзгариши билан электрон энергиясининг ортиб боришида маълум мувофиқлик бўлиши зарур.

Ҳозир дунёда 10 дан ортиқ йирик синхротрон ишлаб турибди. Совет Иттифоқида энг йирик синхротрон 1967 йилда Ереван шаҳрида ишга туширилди. Ереvандаги синхротрон электронларни 6 миллиард электронвольтгача тезлатади. Ҳалқасининг диаметри 50 метрга тенг бўлиб, бу синхротрон ҳам кучли фокусли тезлатгичлар турига киради. Кейинги вақтда синхротонларда протонларни тезлатиш кенг ривожланди. Протонларнинг энг катта кинетик энергияси протон синхротронларида олинди. Ҳозирги кунда Совет Иттифоқида энг йирик протон синхротони ишлаб турибди. Москва яқинидаги Серпухов шаҳрида 1968 йилда ишга туширилган синхрофазотронда протонлар 70 миллиард электронвольтгача тезлатилади.

Одатда, 20—60 *Мэв* энергия берадиган чизиқли тезлатгичларда ионлар дастлаб тезлатиб олиниб, сўнгра бу бошланғич кинетик энергияси билан асосий тезлатгичга узатилади. Чунки тезлик ошиши билан масса ўзгарши бошланғич энергияларда айниқса сезиларли бўлади. Бу ҳолда синхротронда магнит майдонининг, синхрофазотронда эса кучланиш частотасининг ҳам ўзгариш диапазони кескин қисқаради. Ионларга бошланғич кинетик энергия берувчи тезлатгичларни — инжекторлар деб аталади. Катта энергияга мўлжалланган ҳар бир тезлатгичнинг албатта ўз инжектори бўлади.

44-§. СИНХРОФАЗОТРОН

Ҳозиргача биз кўриб чиққан турли тезлатгичларнинг ишлаш принциплари синхрофазотронда мужассамлашган бўлиб, у тезлатгичлар техникасининг энг тараққий қилган маҳсулидир. Айтганимиздек, синхрофазотронда ионларни тезлатиш жараёни магнит майдони ҳамда частотанинг ўзгариши билан бажарилади.

Синхротрон ва фазотронларда магнит майдони ошиб бориши билан частотанинг камайиб бориши ионлар энергиясининг ўсиш жараёнига узвий боғлиқдир. Частотанинг камайиш диапазони инжектордан синхрофазотронга киритиладиган ионларнинг бошланғич энергиясига боғлиқ бўлади. Инжектор ионларининг бошланғич энергияси қанча катта бўлса, синхрофазотронда бир цикл тезлатиш жараёни учун керак бўлган кучланиш частотасининг ўзгариш диапазони шунча кам бўлиши табиийдир.

Синхрофазотронда, худди синхротрондаги сингари магнит майдони ўзгаришининг максимал қиймати тезлатилаётган ионларнинг сўнгги кинетик энергиясини аниқлайди. Табиийки, тезлатувчи оралиқларда кучланиш қийматн қанчалик катта бўлса, магнит майдонининг вақт бўйича ўсиши шунчалик тез бўлиши

керак. Шунинг учун, одатда, тезлатувчи кучланиш қиймати кўпи билан 100 киловольтдан ошмайди. Биринчи қурилган синхрофазотронлар кучсиз фокуслаш асосида ишларди. Шунинг учун уларнинг энергияси унча катта бўлмаган ва тезлатувчи ҳалқаларнинг кўндаланг кесими катта бўлганлигидан жуда катта магнитлардан фойдаланишга тўғри келган. Масалан, ўз вақтида дунёда энг йирик ҳисобланган Дубна шаҳрида қурилган синхрофазотрон магнитининг оғирлиги 36 минг тонна эди.

Кейинги вақтларда синхрофазотронлар фақат кучли фокуслаш асосида қурилмоқда. Кучли фокуслаш принципини татбиқ қилиш фақат ҳалқасимон магнитларни кичикроғига алмаштиришнигина эмас, балки протонлар энергиясини яна ҳам юқорироқ кўтариш, тезлатилган протонлар интенсивлигини ошириш имконини ҳам беради.

Кейинги йилларда бир неча йирик синхрофазотронлар ишга туширилди, кучсиз фокуслаш асосида қурилган синхрофазотронлар кучли фокуслаш принципида ишлашга ўтказилди. Ҳозирги кунда совет ва чет эл олимлари протонларга 100, ҳатто 1000 миллиард электрон-вольтгача энергия берувчи синхротрон ва синхрофазотрон ишлаш принципларига асосланган гигант тезлатгичларнинг лойиҳалари устида иш олиб бормоқдалар.

VI боб

«МИТТИ» ЗАРРАЛАР ОЛАМИДА

45-§ ЗАРРАЛАР ТАВСИФИ

Моддалар молекулалардан, молекула эса атомлардан тузилганлиги маълум*.

Атомлар ўз навбатида, электронлар ва ядролардан ташкил топади. Ниҳоят, ядролар протон ва нейтронлардан тузилган. Протонлар, нейтронлар ва электронлар элементар зарралар деб аталади. Ёруғлик электромагнит тўлқинлардан иборат бўлиб, қатор хусусиятларига кўра уни зарралар тўплами дейиш мумкин. Ёруғлик кванти — фотон-элементар зарралар қаторига киради.

Ҳозирги вақтда бир неча ўнлаб элементар зарралар маълум. Уларнинг номлари, асосий хусусиятлари ва туркумланиши 5-, 6-, 7- жадвалларда келтирилган. Улардан кўриниб турибдики, элементар зарралар учта асосий группага бўлинади: лептонлар — енгил зарралар (грекча «лепта»— энг кичик чақа танга сўзидан олинган), мезонлар — ўртача зарралар («мезос» — грекча «ўртача») ва барионлар — оғир зарралар («бар» — грекча «оғир»). Бироқ, фотон бу группаларнинг бирортасига ҳам кирмайди. Бундай группаларга бўлиниш зарралар массаларининг кетма-кет ўсиб боришини нфодаласа ҳам, ҳар бир группа зарраларининг умумий хусусиятларга эга эканлиги муҳимроқдир. Хусусан, μ-мезон массаси бўйича электрон ва позитронга нисбатан мезонларга яқин бўлишига қарамасдан, электрон билан бир группада туради.

Масса ва хусусий энергия. Нисбийлик назариясига кўра зарраларнинг массаси уларнинг тезлигига боғлиқдир. Шунинг учун зарраларнинг тавснфи сифатида унинг тинчликдаги массаси олинади. Шу назарияга биноан m массага mc^2 энергия тўғри келади (c — ёруғликнинг бўшлиқдаги тезлиги). Зарраларнинг тинчликдаги массасига уларнинг тинчликдаги энергияси ёки хусусий энергняси мос келади. Одатда, элементар зарранинг массаси ҳақида гапирилганда, унинг мегаэлектрон-вольт *(Мэв)* ҳисобида ўлчанган тинчликдаги энергняси назарда тутилади.

---

* Моддалар атомларнинг ўзидан ҳам тузилиши мумкин. Масалан, ҳар бир атоми барча қўшни атомлар билан ўзаро таъсирлашадиган кристалларда молекулаларни ажратиш мумкин эмас.

Элементар зарраларнинг масса бирлиги сифатида электрон массаси — m_e олинади.

Фотон ва нейтрино (μ-мезон нейтриноси ва электрон нейтриноси) умуман, тинчликдаги массадан маҳрум бўлиб, фақат ёруғлик тезлигида ҳаракат қила олади.

Электр заряди ва спин. Элементар зарралар зарядланган ва нейтрал бўлиши мумкин. Зарядланган элементар заряд мусбат ёки манфий бўлади. Зарядланган зарраларнинг абсолют қиймати электрон зарядига тенг. Шунинг учун электрон заряди элементар зарралар зарядининг бирлиги сифатида қабул қилинади. Зарра символининг ёнида, одатда, унинг заряд ишораси (зарядланган зарралар учун) ёки ноль (нейтрал зарралар учун) қўйилади. (Фотон, протон, нейтрон ва нейтрино символларининг ёнида заряд ишораси ёзилмайди.) Нейтрал Λ- ва η-зарралар учун баъзи ҳолларда заряд ишоралари тушириб қолдирилади.

Зарралар хусусий ҳаракат миқдори моментига, яъни спинга эга. Қўполроқ қилиб айтганда, спин зарранинг ўз ўқи атрофида айланишига тўғри келадиган моментдир. Спиннинг бирлиги қилиб, маълумки, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h — Планк доимийси) қабул қилинган. Бу бирликларда фотоннинг спини 1, лептонлар ва барионларнинг спини $\frac{1}{2}$ ва мезонларнинг спини нолга тенг. 5, 6-жадвалдан кўриниб турибдики, массалар фарқи жуда оз бўлган ва қатор умумий ху-

5-жадвал

Барионларнинг характеристикалари

Номлари	Зарралар				Антизарралар				Ички энергияси, *Мэв.*	Ўртача яшаш вақти, *т сек.*
	Белгиси	спини	Изотопик спин	Ажиблиги	Белгиси	Спини	Изотопик спин	Ажиблиги		
Нуклонлар	p^+ n	½ ½	½ −½	0 0	$\bar{p}$ $\bar{n}$	½ ½	−½ ½	0 0	938,25 939,55	∞ $1{,}01\cdot10^{3}$
Лямбда-гиперон	Λ^0	0	0	−1	$\bar{\Lambda}^0$	0	0	1	1115,44	$2{,}61\cdot10^{-10}$
Сигма-гиперонлар	Σ^+ Σ^0 Σ^-	1 1 1	1 0 −1	−1 −1 −1	$\bar{\Sigma}^+$ $\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^-$	1 1 1	−1 0 1	1 1 1	1189,39 1192,30 1197,20	$0{,}8\cdot10^{-10}$ 10^{-14} $1{,}6\cdot10^{-10}$
Кси-гиперонлар	Ξ^0 Ξ^-	½ ½	½ −½	−2 −2	$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^-$	½ ½	−½ ½	2 2	1314,30 1320,80	$3\cdot10^{-10}$ $1{,}7\cdot10^{-10}$

сусиятларга эга бўлган, лекин электр зарядининг ишораси билан фарқ қиладиган зарралар группаларга бирлашадилар: учта π-мезон, иккита K-мезон, иккита нуклон (протон ва нейтрон) учта Σ ва иккита Ξ -зарралар. Шунингдек, η -мезон, Λ зарра ва Ω^--зарра ҳам битта заррадан иборат ўз группаларини тузади деб ҳисоблаш мумкин. Ҳозирги замон назариясига биноан, ҳар бир группа зарралари ҳар хил заряд ҳолатларидаги битта заррадан иборатдир. Зарра қабул қилиши мумкин бўлган ҳолатларнинг сони (группадаги зарралар сони) махсус квант сони-изотопик спин J билан белгиланади. Битта ҳолат (группада битта зарра — синглет) изотопик спиннинг ноль қийматига мос келади, иккита ҳолат (группада иккита зарра — дублет) изотопик спиннинг $\frac{1}{2}$ қийматига мос келади, учта ҳолат (группада учта зарра — триплет) — изотопик спиннинг 1 қийматига мос келади. Изотопик спиннинг берилган қийматида (яъни, группа ичида) зарранинг заряд ҳолати бошқа квант сони — изотопик спиннинг проекцияси билан аниқланади. Бу проекция изотопик спин $J = 0$ бўлганда, ягона — нол қийматга эга бўлади, изотопик спин $J = \frac{1}{2}$ бўлганда эса иккита; $+\frac{1}{2}$ (мусбат зарядланган ҳолат учун)ва $-\frac{1}{2}$ (манфий зарядланган ҳолат учун); $J = 1$ да учта: $+1$ (мусбат зарядли ҳолат учун), 0 (нейтрал ҳолат учун) ва -1 (манфий зарядли ҳолат учун) қийматга эга бўлади.

Лептон ва барион зарядлар. Электронга ва электрон нейтриносига $+1$ электрон лептон заряди берилади, манфий μ-мезонга ва μ-мезон нейтриносига эса $+1$ μ-мезон лептон заряди, барионларга эса $+1$ барион заряди берилади. Бу зарядлар электр зарядидан фарқли ўлароқ, ўзаро таъсирни характерловчи катталик бўлмай, балки зарралар системасининг ҳолатини характерловчи квант сонидир. Буларни киритиш зарурати сақланиш қонунларидан келиб чиқади.

Антизарралар. Юқорида кўрсатилган зарраларнинг кўпчилиги учун антизарра мавжуд. Антизарра зарядларининг ишораси тегишли зарра мос зарядларининг ишорасида қарама-қарши бўлади. Қолган ҳамма хусусиятлари (массаси, яшаш вақти) айнан бир хил бўлади. Масалан, антипротон манфий электр зарядига ва -1 барион зарядига эга. Агар антизарра ўзининг аниқ символига эга бўлмаса, у ўзига тегишли зарра символининг устига чизилган тўлқинсимон ($\sim$) чизиқ билан белгиланади.

Зарра ўзининг антизарраси билан тўқнашганда, уларнинг аннигиляцияси — бошқа енгилроқ зарраларга айланиши — содир бўлади. Протон ва антипротон учрашгандаги аннигиляцияда, асосан, π-мезонлар ва қисман фотонлар вужудга келади.

Электрон ва позитроннинг аннигиляциясида кўпинча иккита, баъзи ҳолларда учта фотон ҳосил бўлади.

Шуни қайд қилиб ўтамизки, «аннигиляция» сўзи «йўқолиш» деган маънони билдирса ҳам, бу термин остида материянинг йўқолишини тушуниш керак эмас, чунки аннигиляция вақтида материя йўқолмайди, балки бошқа кўринишга ўтади, холос.

46-§. АНТИДУНЕГА ОЧИЛГАН ДАРЧА

Дирак 1933 йилда Нобель мукофотини ола туриб сўзлаган нутқида, ҳозирги вақтда бизга оддий туюлган антидунёнинг мавжудлиги ҳақида дастлабки фикрларни айтган эди: «Агар биз мусбат ва манфий зарядлар ўртасидаги тўла симметрияликни табиатнинг асосий қонунлари тақозо этадиган даражада қабул қиладиган бўлсак, Ерда (афтидан, бутун Қуёш системасида) манфий электрон ва мусбат протонлар ортиқчалигини тасодиф деб ҳисоблашга тўғри келади. Баъзи юлдузларда аҳвол бошқача бўлиб, улар асосан, позитрон ва манфий протонлардан тузилган бўлиши эҳтимолдан холи эмас.

Дарҳақиқат, бунда ҳар бир типдаги юлдузлар тенг миқдорда бўлар эди. Бу икки типдаги юлдузлар спектри айнан бир хил бўлиб, уларни бир-биридан ҳозирги астрономик усуллар билан фарқланишни тақозо этадиган бирон бир усул қолмас эди».

Пиллар ўтди, электрон ва позитронлар эса, жуфт зарра — антизарраларнинг бирдан-бир намунаси бўлиб қолаверди. Шу билан бирга манфий протон — антипротоннинг мавжудлиги мутлақо табиий бўлиб қолди, чунки протон Дирак тенгламасида очиқ-ойдин баён этилади. Бироқ протон ва электрон массалари жиҳатидан бир-биридан кескин фарқ қилади. Шу сабабли жуфт протон — антипротонларнинг ҳосил бўлиши учун бир неча миллиард электрон-вольт энергия керак бўлади. Юқорида кўриб ўтганимиздек, космик нурларда анча катта энергияли зарралар мавжудлиги қайд этилган.

Космик нурлар физикларга фақат позитроннигина эмас, балки мюон ва пионларни ҳам туҳфа этди. Шунга қарамай, антипротонни топиш иложи бўлмади. Баъзан, протон «тамоман» Дирак зарраси эмас, чунки ички мураккаблик туфайли (бу ҳақда сўзлаган эдик) унинг магнит моменти Дирак тенгламасидагидан ортиқдир, деган шов-шувлар ҳам бор эди.

Шу проблема муносабати билан физикада юз берган бундай аҳволни академик Я. Б. Зельдович қуйидагича шарҳлайди: «Антипротон ҳақида дастлабки фикр юритилган давр (1932 й.) билан уни кузатилган (1955 й.) давр ўртасида талай вақт ўтди, натижада, баъзи назариётчилар, ҳатто кейинги йилларда антипротонсиз назария чиқаришга ҳам ҳаракат қилишди».

Диракнинг антидунёга очган дарчаси тор бўлиб қолди. Космик нурларда антипротон топилмади. Бунинг устига ўша вақтдаги тезлатгичлар етарли қувватга эга эмас эди.

Мана антипротон кашф этилди (1955 й.) ва етарлича ўрганилди, энди уни нима учун шунчалик узоқ вақт давомида топилмаганлигининг сабабини айтиб ўтамиз. Маълум бўлишича, ҳатто юқори энергияда ҳам антипротон вужудга келавермас экан. Унинг вужудга келиш эҳтимоллиги мезонларникидан бир неча ўн марта кам. Антипротон ҳосил бўлди дейлик, аммо уни «омон қолдириш»га, яъни унн аниқлаш учун зарур бўлган вақт давомида сақланиб туришнга бўлган ишонч кам бўлади. Антипротон тезда ядрога ютилади ва гойиб бўлади.

Бутун ишонч ўша даврда бирдан-бир ва кучли бўлган тезлатгич — бэватронда эди. Бироқ антидунёдан протон массасига тенг массали манфий заррани ажратиб олишга мазкур тезлатгичнинг қуввати ва тадқиқотчининг маҳорати етармикан? — деган савол туғилади. Буига кўпчилик физикларнинг ишончи комил. Янги тезлатгичнинг ажойиб хусусиятларн бундан далолат беради. Тадқиқотчнлардан Эмилио Сегре ва Оуэн Чемберленлар (АҚШ) антипротонни топишга муяссар бўлишди.

Хўш, антипротон қандай олинди?

Бэватронда бир неча миллиард электрон-вольтгача тезлатилган протонлар тезлатгич камерасига жойлашган нишондан кўпгина турли зарраларни чиқаради. Бу ерда енгил ва оғир, зарядланган ва зарядланмаган, беқарор ва узоқ яшовчи, тез ва суст ҳаракатланувчи зарралар мавжуд. Шундай «тўс-тўполонда» ягона антипротонни қандай топиш мумкин? Буни тушуниш учун атом физикасининг илк даврида ўтказилган тажрибани эсга олиш кифоя. Ҳозир буни юқори синф ўқувчиси билади. Магнит майдони таъсири остида радиоактив элементларнинг нурланиши уч қисмга бўлинади: альфа-зарралар бир томонга, манфий бета-зарралар бошқа томонга, нейтрал гамма-нурлар эса, тўғри йўналади.

Бу ерда ҳам айнан шундай. Бэватрон ҳамда қўшимча магнитнинг магнит майдонида фокусловчи қурилмада барча манфий зарядланган зарралар умумий зарралар оқимидан четга бурилган. Барча манфий зарралардан фақат муайян импульсли зарраларнигина магнит майдони ҳимоя деворидаги канал орқали сцинтилляцион счётчикка йўналтирган. Маълумки, импульс масса билан тезликнинг кўпайтмасидан иборат. Шунинг учун счётчикка **антипротон билан бирга ғоят енгил, бироқ катта** тезликка эга бўлмаган манфий пионлар ҳам интилган, шуниси ҳам борки, ҳар бир антипротонга қарийб 50 мингта пион тўғри келади. Демак, **зарраларни ҳаракат тезлиги** ва массасига қараб саралашга **тўғри келади.**

Тадқиқотлардан маълум бўлишича, пионларнинг бўшлиқда тезлиги ёруғлик тезлигининг қарийб 99 процентини ташкил этади, антипротон эса ёруғлик тезлигига нисбатан анча секинроқ учади. Бунинг учун махсус мосламали кейинги магнит зарралар оқимини яна бир бор бурнб, уларни бошқа сцинтилляцион счётчикларга йўналтиради. Зарралар учта счётчикдан ўтар экан,

бунда ёруғлик чақнаши рўй беради ва ёруғликнинг вақт бўйича силжиши осциллограммаларда қайд қилиб турилди. Зарралар тезлиги ўлчанган масофа 12 метрга тенг. Бу масофани антипротонлар 51 наносекундда, пионлар эса 40 наносекундда (1 наносекунд 10^{-9} секундга тенг) босиб ўтган.

Дастлаб, тажриба ўтказувчилар бир счётчик иккинчисига нисбатан 51 наносекунд кеч ёнганда учала счётчикда ёруғлик чақнашининг ҳар бир ҳолати антипротон изидан иборатдир, деб ҳисобладилар. Ҳақиқатда эса, бу анча мураккаб эди. Битта антипротонга анчагина пион тўғри келарди. Бундай нисбатда иккита пион импуьльсларини антипротон изи деб олиш мумкин. Шунинг учун мавжуд учта счётчик қаторига яна иккита счётчик қўшишга тўғри келди. Булар Черенков — Вавилов эффектига асосланган счётчиклар эди.

Черенков ёруғлигини (у баъзан реакторлардаги уран таёқчалари атрофида ҳаво ранг ёруғлик тарзида кузатилади) муайян моддалардаги ёруғликнинг фазали тезлигидан катта бўлган v тезликли зарраларгина вужудга келтиради, яъни $v > \frac{c}{n}$, бунда c — ёруғликнинг вакуумдаги тезлиги, n — ёруғликнинг синиш кўрсаткичи. Мазкур ёруғликнинг тарқалиш бурчаги ҳам зарраларнинг тезлигига боғлиқ. Зарраларни тезлиги бўйича саралайдиган Черенков счётчиклари ҳам айнан шунга асосланган. 1-счётчикда $\frac{v}{c}$ нисбат 79 процентдан ортиқ бўлган заррадан ёруғлик вужудга келади; 2-счётчик эса анча мураккаб бўлиб, бу нисбат 75—78 процент бўлган тезликдаги зарраларнигина саралаб олади. Шунинг учун пионлар 1-счётчикда, антипротонлар эса 2-счётчикдагина импульс ҳосил қилади.

Дастлабки антипротонни аниқлаш учун мана шундай нозик усуллардан фойдаланишга тўғри келди.

Счётчиклардаги ёруғликлар антипротоннинг кашф этилганидан далолат берса-да, олимлар янада янги ишончли далил (хусусан, аннигиляция) топишга ҳаракат қилдилар. Бу фотоэмульсия ёрдамида амалга оширилади. Антипротоннинг биринчи фотосуратида унинг излари ёркин акс этган. Антипротоннинг ядро фотоэмульсияси билан тўқнашувида у билан бирга ядро протони ҳам йўқолиб кетади. Мазкур ядро портлашида кўпгина зарралар катта энергияга эга бўлади. Пион, тез ва суст протонлар ҳар томонга тарқалиб кетади. Бу модда аннигиляцияси ва инсоният кашф этган антимодданинг биринчи юлдузи табиатнинг битмас энергияли манбаларидан бирига дастлабки «қўл уриш»дан иборат.

Ўз массасига эга бўлган элементар зарралар материянинг бошқа шаклига, жумладан тинчлик массаси нолга тенг бўлган зарраларга (масалан, гамма-квантларга) айланиши аннигиляция деб аталади. Бунда материянинг сақланиш қонуни бузилмайди. Фақат материянинг шаклигина ўзгаради. Зарралар системаси-

даги импульс, спин ва зарралар миқдори аввалдагидек қолаверади.

Физикадаги янги кашфиётлар В. И. Ленининг материя ҳақидаги фикрининг нақадар тўғрилигини яна бир бор исботлади.

Элементар зарралар ва ҳаракатнинг янги формалари (ядроларда кечадиган жараёнлар, аннигиляция) қашф этилишида ўз нфодасини топган физиканинг янгидан-янги ютуқларн диалектик материализм қонунларини тасдиқлади.

Бундан ташқари, аннигиляция ҳодисаси элементар зарраларнинг бир-бирларига айланишини характерлайди, материянинг айрим формаларини абсолют чегаралаш мумкин эмаслигини қайд этади. Аксинча, муайян шароитларда материя бир ҳолатдан иккинчи ҳолатга ўта олади.

Аннигиляция ҳодисаси нима билан характерланади?

Электрон — позитронлар жуфтининг аннигиляцияси ҳақида юқорида сўзлаб ўтган эдик. Энди протон ва антипротоннинг тўқнашувида нималар рўй беришини текшириб кўрамиз. Бу зарраларнинг умумий массаси квантлар оқимига айланади. Ёруғлик тезлигида тарқаладиган пионлар ажралиб чиққан энергияни ўзи билан олиб кетади. Улар турли ўзгаришга дуч келиб, ҳар хил реакциялар вужудга келтиради. Натижада бир-бири билан тўқнашган зарраларнинг массаси ва энергияси пионлар, мюонлар, фотонлар ва нейтринолар «ихтиёрида» бўлади.

Демак, атом ва антиатомнинг тўқнашишида электрон, позитронларнинг, шунингдек, нуклон ва антинуклонларнинг шиддатли аннигиляция жараёнлари юз беради.

Барча мазкур жараёнлар натижаси ўлароқ талай миқдорда энергия ажралиб чиқади. Бу энергиянинг кўп қисми нейтрино оқимига ҳамда моддалар билан суст ўзаро таъсирда бўладиган ғоят қисқа тўлқинли гамма-нурларга тўғри келади. Шунга асосланиб айтиш мумкинки, аннигиляция энергиясидан тўлиқ фойдаланишга яқин вақтларда эришиш қийин. Агар бу ғоя амалга ошадиган бўлса, инсон битмас-туганмас энергия манбаига эга бўлади. Чунки 1 *кг* модда ва антимодданинг тўлиқ ўзаро таъсирида ажралиб чиқадиган энергия 3 миллиард тонна тошкўмир ёнганида олинадиган энергиядан 3 миллиард марта, шунча миқдордаги ураннинг атом реакторида «ёниши»дан ҳосил бўлган энергиядан эса минг марта зиёд бўлади.

Мисол тариқасида шуни айтиш керакки, 1 килограмм оддий ёқилғи ёнганда $7 \cdot 10^3$ *ккал*, ядро емирилишида эса оддий ёқилғиникидан уч миллион марта кўп, яъни $2 \cdot 10^{10}$ *ккал*, термоядро синтезида эса, яна ҳам кўпроқ—$1{,}5 \times 10^{11}$ *ккал* энергия ажралади. Аннигиляция жараёнида киши кўз олдига келтира олмайдиган миқдорда—$2{,}15 \cdot 10^{13}$ *ккал*, яъни термоядро синтезидагидан 143 марта кўп энергия ажралиб чиқади!

Антимодда тайёрлаш учун ғоят кўп энергия талаб этилади. У ҳали-бери иқтисодий жиҳатдан фойда келтирадиган даражага эриша олмаса керак.

Бундан ташқари, антимоддани қандай сақлаш керак? — деган масалани ҳал қилмоқ лозим. Бунинг учун қандай идиш ясалмасин, антимодда унга тегиши биланоқ, бир зумда уни аннигиляциялайди. Бу ҳолни қизиб, лахча чўғ бўлиб турган печда порох сақлашга ўхшатиш мумкин. Антимоддани сақлаш — келажакнинг иши. Шунга қарамай, мазкур масалани ҳал этишнинг асосий йўлларини ҳозирданоқ белгилаш лозим.

Энди, муҳтарам ўқувчилар, антинейтроннинг кашф этилиши ҳақида тўхталиб ўтсак. Антинейтроннинг топилишн Сегре ва Чемберленлар кашфиётнинг муқаррар натижаси бўлди. Антипротон антинейтронга антидунёдан физиклар лабораториясига борадиган қисқа йўлни белгилаб берди. Ҳар ҳолда, мазкур зарра ҳам олимларни изланишлар олиб боришларида катта ёрдам кўрсатди.

Балки, буларнинг ҳаммаси физиклар учун оддий нарса бўлиб туюлиши мумкин. Антинейтроннинг кашф этилишини улар антинейтрон антипротоннинг қайта зарядланиш маҳсули тарзида ажратиб олинди, деб изоҳлашлари мумкин. Бу протон — антипротон жуфтининг нейтрон — антинейтрон жуфтига айланиши, демакдир: $p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n}$.

Физикларнинг мазкур «баёни»га бир оз қўшимча киритиш фойдадан холи бўлмас.

Тез протон атом ядросига учиб киришида, унда ўзгаришлар юз беради ва нейтрон тарзида ядродан сиртга учиб чиқади. Бу кўпдан бери маълум. Антипротон ҳам шундай хусусиятга эга бўлса керак, деб қараларди. Антипротон вужудга келганидан сўнг сцинтилляция счётчикларидан бирининг экранида ёруғлик чақнаши кузатилди, у антипротонникидан анча суст эди. Демак, счётчикка қандайдир номаълум нейтрал зарра учиб кирган. Балки у антинейтрондир? Кейинги счётчикни ҳам кузатайлик-чи. Бу ерда зарра «портлаб» йўқ бўлиб кетади. Бундан чиқдики, бу ерда аннигиляция юз берди: антинейтрон нейтрон билан тўқнашиб, мезон қуюнига айланди. Корк, Лембертсон, Пиччиони, Венцеллар нозик ва ажойиб тажрибалар асосида антинейтроннинг мавжудлигини исбот этдилар.

47-§. «УНГ» ВА «ЧАП» НИНГ ТЕНГ ҲУҚУҚЛИ ЭМАСЛИГИ

Физиклар антипротон ва антинейтронларнинг топилиши ва текширилишида қизиқ фактга дуч келдилар.

Ядро реакцияларида антипротоннинг қатнашиш эҳтимоли протон ва нейтронларникидан анча ортиқ экан. Антизарралар активроқ бўлса керак. Нуклонлар ўз тузилиши жиҳатидан мураккаб бўлиб, яхши ўрганилмаган. Уларни пионлар булути билан қуршалган сингдирмовчи кернлар (ўзаклар) тарзида тасаввур қилиш мумкин.

Нуклонлар ва антинуклонлар ўртасидаги кучли ўзаро таъсирлар ажойиб бир фикрни келтириб чиқаради. Нуклон билан

антинуклон пионларга аннигиляцияланса, у ҳолда тескари жараён ҳам содир бўлиши керак. Демак, катта энергияли пионни секинлаштириб, бошқа пионда нуклон-антинуклон жуфти ҳосил қилиш мумкин. Жуфтларнинг вужудга келиш вақтида бир-бири билан тўқнашган мезонлар катта куч майдонини ҳосил қилади, бунда янги жуфтни унинг кванти деб ҳисоблаш мумкин. Бундан фақат пионгина нуклонлар таъсирлашувининг кванти бўлиб қолмай, балки нуклон ва антинуклон ҳам асос эътибори билан мезон таъсирлашувининг кванти бўла олади, деган асосли хулоса келиб чиқади. Бу — элементар зарралар ўртасидаги мавжуд бўлган ва кам ўрганилган ўзаро боғлиқликнинг мисоли бўлиб, бошқа нуклонларнинг тузилиш схемасига айрим тузатишлар киритиш имконини беради. Нуклон кернини шундай майдонли зона деб қараш мумкинки, бу майдоннинг кванти нуклон — нуклон жуфтидан иборат бўлиши керак.

1950 йилдан бошлаб тадқиқотчилар бир қанча янги зарралар топишга муваффақ бўлдилар. Бу зарраларнинг ўзига хос хусусиятлари мавжуд назарияга ҳеч тўғри келмади. Космик жалалар фотопластинкаларда қолдирадиган излар орасида номаълум излар ҳам кўзга ташланади. Уларнинг шакли грек ҳарфи «λ» ни эслатади. Шубҳасиз, зарядсиз ва демак, из қолдирмайдиган қандайдир номаълум зарра парчаланган, деб тахмин қилиш мумкин. Бироқ у ҳозирчалик номаълум бўлиб, зарядли ва из қолдирадиган икки заррага парчаланган.

Янги зарралар изларини синчиклаб ўрганиш ушбу ажойиб ҳодисанинг содир бўлишида, оз бўлса-да, нейтрал зарраларнинг иштирок этишини кўрсатди. Протон ва манфий пионга парчаланувчи бу зарра ламбда-зарра деб, парчаланиши натижасида пионлар вужудга келтирган иккинчи зарра эса K-зарра деб атала бошланди. Ламбда-зарралар массаси 2181, K-зарраларники эса, 965 электрон массасига баробардир.

Микродуёнинг эндигина топилган вакилларини физиклар ҳали «номлашга» улгурмаслариданоқ, фотосуратда λ ҳарфи номаълум зарядланган зарралар ҳамда уларнинг парчаланишидан ҳосил бўлган маҳсулотларнинг изидан ташкил топгани маълум бўлди. Шу билан бирга, бошқа иккиламчи зарра нейтрал ва, бинобарин, кўринмас бўлган. Маълум бўлишича, K-зарра гоҳ икки, гоҳ уч пионга парчаланар экан. Узлуксиз кашфиётлар! Бундан ҳатто физикларнинг ҳам боши гангиб қолди. Элементар зарралар жадвалига яна етти зарра аъзо бўлиб кирди (ламбда ва K-зарралар ҳам шулар жумласидандир). Протондан оғирлари гиперон деб аталади.

Шундай қилиб, учта K-мезон (K^+, K^- ва K^0) ва тўртта гиперон; ламбда, 2340 электрон массали плюс ва минус ишорали иккита сигма ҳамда қарийб 2580 электрон массали кси-гиперон кашф қилинди.

Оғир мезонлар ва гиперонлар синчиклаб ўрганилиши натижасида уларнинг беқарорлиги ва бор-йўғи 10^{-8}—10^{-10} секунд-

гина яшаши аниқланди. Уларнинг парчаланиши турлича бўлиши мумкин. Айнан шу нарса физикларни дастлаб чалғитган эди.

Бироқ бу янги кашф қилинган зарраларнинг асосий хусусияти эмас. Улар хусусиятининг энг ажиб ери уларнинг узоқ вақт яшашидир. Нима учун секуннинг 10 миллиард улуши бизга жуда ҳам узоқ туюлишини англаш учун микродунёга хос бўлган ўзаро таъсирнинг турлари (кучли, электромагнит ва кучсиз)га яна қайтишга тўғри келади.

«Кучли» ёки «кучсиз» ўзаро таъсирлар деб айтишимиз у қадар тўғри эмас. Бу ерда гап кучсиз ва кучлилигида эмас, балки реакциянинг тезлигидадир. Аслида физиклар бошқа реакцияларга нисбатан абсолют ва нисбий тарздаги тезликнигина ўлчайдилар.

Кучли ўзаро таъсир ядро кучлари натижасида вужудга келадиган кўпгина тез ўтар жараёнларни бунёд этади. Бу нейтронларнинг протонлар билан, пионларнинг нуклонлар билан ўзаро таъсиридан иборат. Жараён тезлиги зарралар ўлчамининг улар ҳаракатининг тезлигига нисбати билан белгиланади. Шунинг учун, агар нуклонлар ўлчами 10^{-13} сантиметрга, уларнинг тезликлари эса, ёруғлик тезлиги (10^{10} *см/сек*) га тенг бўлса, кучли ўзаро таъсирлар билан боғлиқ бўлган жараёнлар 10^{-13}: 10^{10} = 10^{-23} секундгина давом этади. Шунча вақт мобайнида ёруғлик зарра ўлчамига тенг келадиган масофани босиб ўтади. Бундай қисқа вақт мобайнида зарраларнинг ўзаро таъсирида бўлиши учун бу таъсир ғоят кучли бўлиши керак.

Кучсиз ўзаро таъсирлар жуда секин ўтади. «Ажиб» зарраларни ғоят узоқ яшайди дейишимизнинг боиси ҳам шунда.

Кучли ўзаро таъсирлар натижасида ҳосил бўлган бу зарралар, юзаки қараганда, кучли ўзаро таъсирга хос тезликда парчаланиши лозим эди, бироқ бу ҳол юз бермайди ва «ажиб» зарралар узоқ яшайдилар.

Кучсиз ўзаро таъсирлар ҳақида гап борганда, аввало бизга маълум бўлган бета-емирилиш эсга олинади. Бу яхши ўрганилган жараёндир. Радиоактив бета-емирилиш жараёнида нейтрон ўз-ўзидан протон ва электронга парчаланади. Электрон учиб кетади ва Менделеев жадвалининг навбатдаги хонасида жойлашган элемент ҳосил бўлади. Ўз-ўзидан бета-емирилиш фақат табиий радиоактивликка эга бўлган элементлардагина юз беради.

Янги маълумотларга кўра, эркин нейтроннинг яшаш вақти 11,7 минутга тенг. У беқарор элементар зарралар ичида энг узоқ яшовчиси ҳисобланади. Нейтрон массаси унинг парчаланишидан ҳосил бўлган маҳсуллари (протон ва электрон) массасидан 780 000 электрон вольтга эквивалент энергия миқдорида ортиқдир. Сақланиш қонунига кўра, бу ортиқча энергия парчаланиш маҳсулининг кинетик энергиясига ўтиши керак. Бироқ энг аниқ текширишлар шуни кўрсатадики, парчаланиш маҳсул-

лари ҳар вақт энергиянинг бир қисминигина олиб кетади: кинетик энергия дам-бадам ўзгариб туради.

Табиатнинг мазкур янги жумбоғи фақат икки йўсиндагина ҳал этилиши мумкин: ё энергиянинг сақланиш қонуни бузилади, ё кўринмас яна бир зарра учиб чиқади. Физиканинг асосий қонунини рад этгандан кўра, янги зарранинг мавжудлигига ишонган маъқул, албатта. Мана шу йўсинда микродунёда нейтрино мавжудлиги ҳақида ғоялар бунёдга келди.

Нейтрино тўхтамайди ва модда билан ўзаро таъсирга берилмайди. Нейтрино Ер қатламларидан ўтиб, планетамиз марказига яқин жойларда секинлашади ва ўзини вакуумдагидан бошқача тутиш эҳтимоллиги 1/1 000 000 000 000 ни ташкил этади.

Ўзаро таъсирларнинг кучли ва кучсизлиги элементар зарраларга хос бўлган абадий хусусият эмас. Айтиб ўтганимиздек, айни бир нейтрон ҳам кучли ҳам кучсиз ўзаро таъсирларда иштирок этаверади. Пион кучли ўзаро таъсирлар келтириб чиқарадиган реакцияларда иштирок этади, бироқ кучсиз ўзаро таъсир қонуни бўйича парчаланадиган «ажиб» зарраларнинг маҳсулларида ҳам пионлар учрайди. Нейтрал пионнинг маҳсулларида ҳам пионлар учрайди.

Нейтрал пионнинг иккита фотонга парчаланиши, шунингдек электронларнинг фотонда сочилиши таъсирлашувнинг янги синфи — электромагнит таъсирлашувларни характерлайди. Фақат нейтриногина ажойиб барқарорликка эга бўлиб, кучсиз ўзаро таъсирдан бошқа бирорта ҳам таъсирларда иштирок этмайди.

Физиклар кучсиз ўзаро таъсирлар реакциясига диққат билан назар солиб, янги бир ҳодисанинг гувоҳи бўлишди. Иккита «ажиб» зарранинг бири учта пионга, иккинчиси эса, икки пионга парчаланар экан. Ўша вақтларда ҳар хил зарралар турлича емирилиш билан характерланади, деб ҳисобланган учун биринчисини тау-мезон, иккинчисини эса тета-мезон деб атадилар. Айнан шу ерда парадокс ҳолат юз берди: тау ва тета зарраларнинг ҳар иккиси ҳам мутлақо бир хил хусусиятга эга экани маълум бўлди. Уларнинг барча параметрлари: массаси, турли ўзаро таъсирларда пайдо бўлиш нисбий частотаси ва яшаш вақти бир-бирига мос келди. Эндиликда бизга маълумки, бу айнан бир типдаги зарра, яъни *К*-мезондир. Бироқ тау — ва тета — белгилари сақланиб қолиб, у икки мезонга бўлинувчан зарралар жумласига киради. Гап шу ерга келганда мавзуни тўхтатиб туриб, микродунёнинг қонунларидан бири — жуфтликнинг сақланиш қонуни билан муҳтарам ўқувчиларни таништиришни лозим топдик.

Физик жуфтлик — бу арифметикадаги оддий жуфтлик эмас. У зарраларнинг чап ва ўнгга нисбатан симметриясини ҳамда ўнг томонни чап томонга ва, аксинча, алмаштирилишида шу зарраларнинг ҳолатини характерлайди. Бундай ўзгариш (инверсия) фазовий *xyz* координатлар ишораларининг алмашинишини билдиради. Мазкур алмашиш кўзгудаги акс этишга ўхшашдир.

Биринчи қарашда қандайдир жисмнинг кўзгудаги акси ўз аслидан мутлақо фарқланмайди. Шундай экан, кўзгуга қарашнинг нима ҳожати бор? Масалан, шар ҳақиқатан ҳам, кўзгудаги кўринишига мутлақо мос келади. Бу кўзгули-симметрик буюмдир. Аммо кўзгуга қандайдир бурама мих яқинлаштирилса, михнинг ўнг кесиги кўзгуда чап кесик бўлиб кўринади. Айтайлик, сиз бўй баравар ойнага қараб турнбсиз. Ойнадаги аксга мувофиқ юрагингиз ўнгда бўлади. Демак, одам, винт, моллюска чиганоғи, хуллас, физик жисмларнинг аксарият кўпчилиги кўзгули — асимметрикдир. Квант механикаси кўзгули симметрик ва кўзгули — асимметрик буюмлардан келиб чиқиб, мусбат ва манфий фазовий жуфтликлар ёки жуфт ва тоқлик мавжудлигини белгилайди.

Жуфтлик сақланмаслигининг маъноси шундаки, бирон-бир буюмнинг симметриклиги ёки асимметриклиги унинг табиатига эмас, балки шу буюмнинг қандай координат системасида — «кўзгу олдида» ёки «кўзгу орқасида» эканлигига боғлиқ.

Бироқ мазкур координат системалари бир системадаги ўнг томоннинг бошқа системадаги чап томонга ва аксинча алмашинишн билан бир-биридан фарқланади. Демак, жуфтликнинг сақланмаслиги фазода «чап» ва «ўнг»нинг тенг келмаслигидан бўлса керак, деган хулоса чиқариш мумкин.

Ҳар ҳолда, «тау-тета» жумбоғи ҳал қилиниши лозим. Бунда икки турли зарраларнинг парчаланиши ҳамда жуфтлик қонунининг сақланиши кузатилади, деб тахмин қилиш осоироқ, албатта. Лекин зарралар жараён давомида айнан бир хил хусусиятда бўлиб, уларни фарқлайдиган бирон-бир белги сезилмайди.

АҚШда тадқиқот ишлари олиб бораётган хитойлик ёш олимлар, Нобель мукофотининг лауреатлари Ли Цзен-дао ва Янг Чжень-лин «тау-тета» жумбоғининг калити кучсиз ўзаро таъсирларда жуфтликнинг сақланмаслигидадир, дейиш билан чекланмай, балки бу ғояни тажрибада синаб кўриш усулларини ҳам айтиб бердилар.

Тажрибанинг моҳияти қуйидагича.

Электронлар кўпинча қай томонга — парчаланаётган зарралар спинлари йўналишида ёки унга тескари йўналишда учишини белгилаш мақсадида бета-емирилиш жараёнида парчаланадиган зарра ёки ядроларни қандайдир усулда қутблаш лозим. Ниҳоят, 1956 йилнинг охирида Ву Чьен-шьюнг бошлиқ бир группа физиклар магнит майдони ва абсолют нолга яқин ҳарорат таъсири остида кобальт-60 ядроларини (шу ядро спинларини бир томонга йўналтирадиган қилиб) ориентирлашга муваффақ бўлишди.

Мазкур ажойиб тажрибалар натижаси хитойлик физиклар гипотезасини тасдиқлади. Кучсиз ўзаро таъсирларда жуфтликнинг сақланиш қонуни рад этилди. Чап ва ўнг йўналишлар, ҳа-

қиқатан ҳам, тенг эмас экан. Пион ва мюонларнинг емирилиш реакцияларида ҳам бу ҳол ўз ифодасини топди.

Жуфтликнинг сақланиш қонуни зарядланган *К*-мезоннинг мюон ва нейтринога парчаланишида ҳам ўзини оқлай олмади.

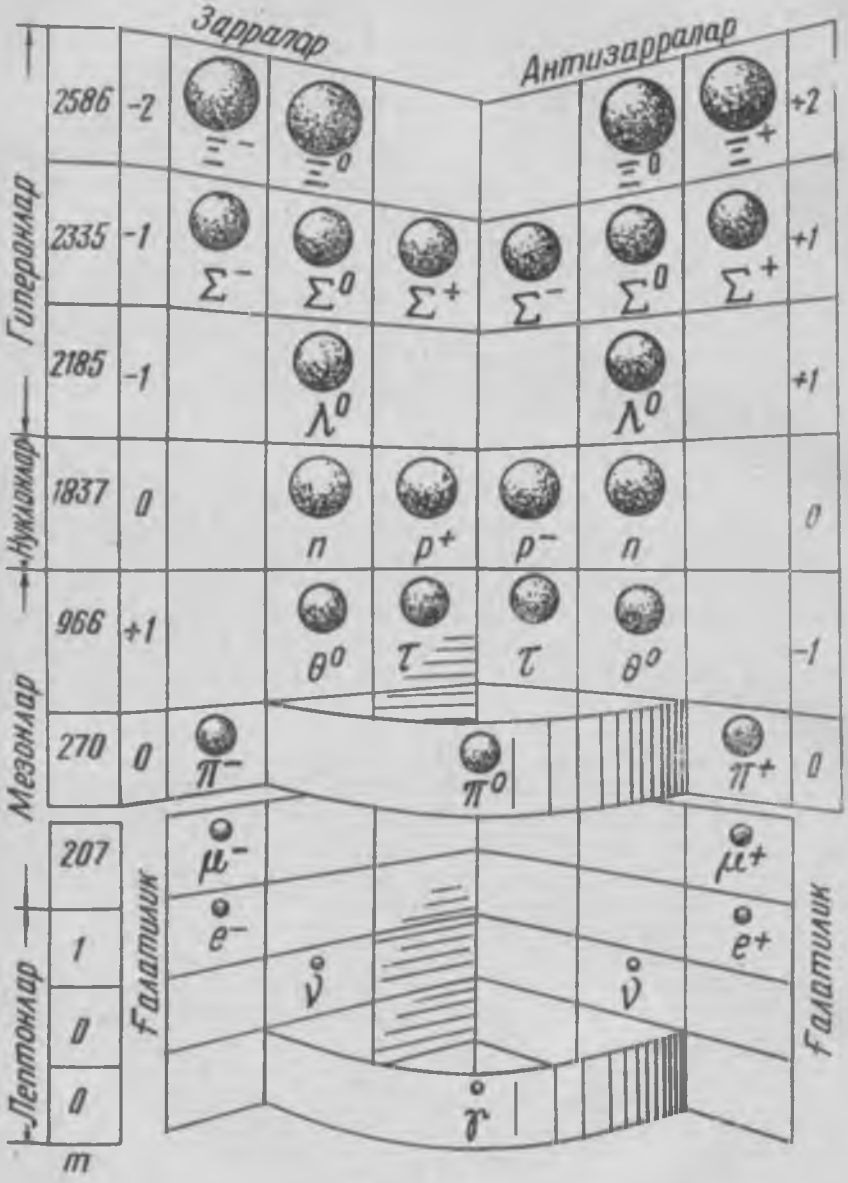
Бироқ кучсиз ўзаро таъсирларда жуфтликнинг сақланмаслиги ҳақида узил-кесил фикр айтиш учун яна бир жумбоқни ҳал этишга тўғри келади. Гап шундаки, жуфтлик бузилиши кузатиладиган барча жараёнлар бир умумий хусусиятга эга, яъни емирилишнинг сўнгги маҳсуллари орасида камида битта нейтрино кузатилади. Балки, жуфтликнинг бузилиши нейтринонинг характерли хусусиятидир.

Яна бир нарсага диққатни жалб қилмоқ лозим. Маълумки, «тау-тета» жумбоғида нейтрино иштирок этмайди. Бунда жуфтликнинг сақланмаслиги бошқача йўллар билан исботланган. Шунинг учун ҳам кун тартибида нейтриносиз лоақал битта жараёнда жуфтликнинг сақланмаслигини исботлаш масаласи турарди. Ушандагина жуфтликнинг сақланмаслиги мутлақо барча кучсиз ўзаро таъсирларга хос, деб дадил айтаверсак бўлади.

Бундай тажрибалар 1957 йилнинг баҳорида ўтказилди. Юқори энергияли манфий пионлар оқими протонларга йўналтирилди. Протон билан пионнинг тўқнашуви натижасида иккита «ажиб» зарра: ламбда-зарра ва *К*-мезон вужудга келди.

Ламбда-зарра емирилиб, одатда, манфий пион ва протонга айланади. Дастлабки пион (парчаловчи зарра)нинг учиш йўли ҳамда ламбда йўналиши бўйича хаёлан текислик ўтказиш мумкин. Энди ламбда зарралар емирилганда ҳосил бўладиган пион қандай учишини кузатамиз. Гапни очиғини айтганда, бизни пионнинг хаёлан чизилган текисликдан «юқорига» ва «пастга» томон учиши қизиқтиради. Бу ерда «юқори» ва «паст» деганда нимани тушунмоқ керак? Бунда қуйидагича шартга амал қилинади. Агар ўнг қўлнинг кўрсаткич бармоғини дастлабки пионнинг учиш йўлига, ўрта бармоқни эса ламбда-зарралар траекториясига қўйсак, бунда бош бармоқ «юқори»ни кўрсатади, деб ҳисоблаймиз. Буларнинг ҳаммаси шартли, албатта. Бунда кўзгудаги акс этишга мувофиқ, бизнинг «юқори» ва «паст» белгиларимиз ҳам ўрин алмашади. Биз учун эса бир йўналишни иккинчисидан фарқ қила билиш муҳим. Жуфтлик қонуни тўғри бўлиб, табиатда ҳар қандай йўналишлар «фарқсиз» ҳисобланса, бунда ҳосил бўладиган пионлар бир хил тарзда «юқорига» ва «пастга» томон учади. Бироқ ўтказилган тажрибалар буни тасдиқламади: пионларнинг кўпи «юқорига» учишини исботлади.

Натижада, табиатда йўналишлар турлича бўлиб, «ўнг» йўналиш «чап»га ва «юқори» — «паст»га тўғри келмайди, деган хулосага келинди. Янг Чжень-линь ва Ли Цзен-даоларнинг кашфиётидан кейин академик Л. Д. Ландау дунёда симметрия йўқолиб кетмай, аксинча, у янада табиий қиёфа касб этганлигига алоҳида эътибор берди ва у абсолют симметрия вакуумда — майдонсиз ердагина мавжуд бўлади, деган хулосага келди.



29-расм. Элементар заррачаларнинг кўзгу симметриклиги.

Лекин реал олам асимметрик бўлиши керак. Бу унинг зарра ва антизарралар «нотенглиги» билан боғлиқ бўлган ўзгармас хусусиятидир.

Ажойиб хусусиятли кўзгуни тасаввур қилиб кўрайлик. Унда буюм оддийгина акс этиб қолмай, балки бу кўзгу заррани тегишли антизарра билан алмаштиради (29- расм). Бунда, физикларнинг тили билан айтганда, «зарядлар туташиши» юз беради.

Хўш, бизга бундай кўзгунинг нима кераги бор?

Гап шундаки, кучсиз ўзаро таъсирларда фақат танланадиган йўналишгина эмас, балки жараёнда зарралар ёки антизарраларнинг иштирок этиши ҳам фарқсиз эмас. Ёки, физиклар иборасига кўра, кучсиз ўзаро таъсирлар фазовий инверсияга нисбатан ҳам, зарядлар туташишига нисбатан ҳам инвариант эмас.

Агар мазкур ишлар айни бир вақтда бажарилса, яъни «ўнг»ни «чап»га ва аксинча, зарраларни эса тегишли антизарралар билан алмаштирилса, система хоссалари ўзгармайди.

Буни изоҳлаш учун кўзгули-асимметрик буюмлар аксини кўрайлик. Агар бундай аксни яна такрорлайдиган бўлсак, ҳаммаси ўз ўрнига қайтади, яъни мисолимиздаги юрак чапга ўтади, бурама мих кесиги ҳам чапда бўлади. Айнан шундай симметрия хусусияти ҳар қандай системада «чап»ни «ўнг»га, шунингдек, заррани антизаррага алмаштиришда ҳам кузатилади. Л. Д. Ландау уни комбинацияли жуфтлик деб атайди.

Комбинацияли жуфтликнинг сақланишидан яна бир ажойиб қоида келиб чиқади. Маълум бўлишича, барча ўзаро таъсирлар вақт инверсиясига аҳамиятсиз (инвариант)дир, яъни ўзаро таъсирлар вақтга — «келажак»нинг «ҳозир»га алмашинишига боғлиқ бўлмайди. Яқинда А. И. Алиханов, Г. П. Елисеев ва В. А. Любимовлар тажриба асосида «вақт»нинг, бинобарин, комбинацияли жуфтликнинг сақланишини исботладилар.

Комбинацияли жуфтлик микродунёнинг нейтрино ва унинг антизарраси — антинейтрино мавжуд бўлган энг «қоронғи бурчи»ни ҳам ёритди.

Комбинацияли инверсияда заррани антизарра ва «ўнг»ни «чап»га алмаштирганда, қутбланиш ҳам ўзгармоғи лозим. Олиб борилган тадқиқотлар натижасида нейтрино ҳаракат йўналишига қарши қутбланган, антинейтрино эса ҳаракат йўналиши бўйича қутбланган, яъни нейтринолар спини ҳаракат йўналиши бўйича, антинейтринолар эса тескари йўналган, деган фикр туғилди.

Табиий равишда шундай савол туғилади: хўш, кучсиз ўзаро таъсир фазовий жуфтликнинг сақланиш қонунига амал қилмас экан, нега кучли ёки электромагнит ўзаро таъсирлар бу қонунга бўйсуниши керак? Бунга ёш совет олими В. Г. Соловьёв жавоб берди.

Фазовий жуфтлик фақат электромагнит ўзаро таъсирларда ва, умуман, нейтрал пионлар иштирок этадиган кучли ўзаро таъсирларда сақланади. Бунинг боиси нимада? Бу саволга жавоб

қайтариш энди мушкул эмас. Ахир, фотон ва нейтрал пион антизаррасиз, аниқроғи, айни вақтда антизарра вазифасини ўтайдиган бирдан-бир зарралардир. Шунинг учун зарядларни алмаштириш уларга таъсир кўрсатмайди, демак «чап» «ўнг» билан тенг ҳуқуқлидир.

Аммо кучли ўзаро таъсирларда «ажиб» зарралар иштирок этганда, жуфтлик қонуни амал қилмаслиги керак. Демак, «ажиб» зарралар маълум даражада кучли ўзаро таъсирларнинг оралиқ ҳолатларида иштирок этиши сабабли бу ерда ҳам фазовий жуфтликнинг сақланиш қонуни қисман бузилади.

Фазовий жуфтлик сақланиш қонунининг ўрнига табиатда мураккаб жуфтлик сақланиш қонуни ҳукмрондир. «Ўнг» ва «чап»нинг тенг ҳуқуқлилиги эса баъзи бир зарраларнинг антизарралар билан тенг ҳуқуқлилиги оқибати бўлиб, фақат айрим ҳоллардагина рўй беради.

48-§. ЎН ИККИ ЗАРРА

Антизарралар оддий зарралардан пайдо бўлиши мумкин. Бироқ шу билан бирга, зарралар кернининг нуклон-антинуклонли майдони антизарралар майдонидан фарқланишини эътироф этиш керак. Икки нуклонда кернлар ўзаро итарилади, нуклон ва антинуклонда эса, улар аннигиляцияланади. Бунинг боиси нимада? Ҳозирча бу саволга аниқ жавоб топиб бўлмайди. Нуклон ва антинуклон кернлари турлича ҳолатлардаги айни бир моддадан ташкил топган, деб фараз қилиш мумкин, холос.

Микродунёдаги барча зарраларнинг иккига — зарра ва антизарраларга бўлинганлиги ҳаммадан аввал кўзга ташланиб туради. Зарядланган зарралар ҳам, нейтрал зарралар ҳам ўз мухолифларига эга. Ҳатто, фотон ҳам маълум математик маънода ўз антизаррасига эга. Бунда тенгламанинг икки усулда ечилишини ҳам мутлақо бир хил шарҳлаш мумкин, чунки фотон ва антифотон бир-биридан фарқланмайди. Бошқача қилиб айтганда, фотон хусусий антизаррадир.

Умуман олганда зарра ва антизарралар дейиш шартлидир. Лекин қандай пионни зарра деб ва қайси бирини антизарра деб ҳисобламоқ керак? Микродунёнинг ички қонуниятларини қандай туркум ва классификациялар яққол акс эттира олади?

Қирқинчи йилларнинг охирида америкалик физиклар Гелл-ман ва Розенбаум ўша вақтларда мунозарасиз ва ўзгармас бўлиб туюлган «моддаларнинг ўн икки заррадан тузилиш назарияси»ни майдонга ташладилар. Фотон, электрон, протон ва нейтрон каби зарралар ҳам шу ўн икки зарра туркумига киритилган. Айнан ўша зарраларнинг тинчлик массаси (фотонда йўқ) заряд (фотон ва нейтронда йўқ) ва спин миқдори бўйича бўлиниши каби тушунчаларнинг вужудга келишига имкон берди. Бундай бўлинишни систематика деб юритилади. Бу назарияга кўра бизга маълум бўлган фермион ва бозон зарраларига кейинчалик то-

пилган антизарралар ҳам қўшилди. Тинчлик массаси бўйича зарралар тўртта группага бўлинади, улар қуйидагилардан иборат: оғир зарралар — барионлар (5-жадвал) (протон, нейтрон ва уларнинг антизарралари); ўртача оғирликдаги зарралар — мезонлар (6-жадвал), енгил зарралар — лептонлар (7-жадвал) ва, ниҳоят, фотонлар. Мазкур назария атом хоссаларини шарҳлашда ғоят аниқ маълумот беради. Бироқ бу назария ёрдамида ядронинг ички жараёнларини таҳлил қилишда умумий тарзда маълум даражада изоҳ бернлганлигига қарамай, унинг ғоят дағал назария эканлиги аён бўлди.

6-жадвал

Мезонлар характеристикалари

Номлари	Спини	Изотопик спин	Зарра белгиси	Антизарра белгиси	Ички энергияси, *Мэв*	Ўртача яшаш вақти, *сек*
Пионлар	0^-	1	π^+	π^-	139,58	$2{,}6\cdot10^{-8}$
	0^-		π^0	$\pi^0\equiv\pi^0$	134,97	$1{,}8\cdot10^{-16}$
Каонлар	0^-	½	K^+	K^-	493,78	$1{,}2\cdot10^{-8}$
			K^0	K^0	497,8	10^{-8}—10^{-10}
Эта-мезонлар	0^-	0	η	$\eta\equiv\eta$	548,8	10^{-19}
Ро-мезонлар	1^-	1	ρ^+	ρ^-	765	10^{-23}
			ρ^0	$\rho^0\equiv\rho^0$	780	10^{-23}
Омега-мезонлар	1^-	0	ω	$\omega\equiv\omega$	782,8	10^{-23}—10^{-23}

Янги зарраларнинг кашф этилиши назарияга янги система киритишни тақозо қилди ҳамда микродунёнинг ички қонуниятлари очилмаганлигини кўрсатди.

Лептонлар характеристикалари *7-жадвал*

Номлари	Спини	Массаси	Ички энергияси, *Мэв*	Зарра белгиси	Антизарра белгиси
Электрон нейтриноси	½	0	0	ν_e	$\tilde{\nu}_e$
Электрон	½	1	0,511	e^-	e^+
Мюон нейтриноси	½	0	0	ν_μ	$\tilde{\nu}_\mu$
Мюон	½	207	105,66	μ^-	μ^+

Микродунё «жадвал»ида қанчалик кўп зарра пайдо бўла боргани сари физиклар уларни асосий бирламчи зарраларнинг қандайдир минимал миқдори билан тартибга солишни хоҳлар эдилар. Шунинг учун янги зарраларнинг кашф этилиши билан бир қаторда, физиклар ягона назария яратиш ҳаракатидалар.

«Ўн икки заррa» масаласи ўртага ташланган вақтда элементар зарралар борасида физикларга маълум бўлган маълумотлар умуман олганда шу қадар саёз эдики, юритнладиган тўғри муҳокамалар ҳам нотўғри натижага олиб келарди. Мюоннинг мавжудлиги фикримизнинг ёрқин далили бўла олади. Модданинг ўн икки заррадан тузилганлигини шарҳловчи назария муаллифлари ёзган мақолаларидан бирида бундай ғайри оддий заррани ғоят образли қилиб қуйидагича характерлайдилар: «Бу борада бнз табиатнинг зўр макрига дуч келдик. Табнат шундай заррани туҳфа этдики, назарий физика нуқтаи назаридан унда ҳеч қандай ҳуқуқ йўқ эди ва ундан оқилона фойдаланиш имкони бўлмади». Мюон кулба остонасида топилган «ташландиқ бола» эди.

49-§. МЮОН ЭЛЕКТРОН-МИ?

Одатда, зарраннг магнит моменти магнетонларда ифодаланади. Магнетонларда ифодаланган магнит моменти миқдорининг спин моментига нисбати «g-факторни» беради. Бунинг устида ортиқча бош қотириб ўтиришнинг ҳожати йўқ. g-фактор мавжудлигини эсга олишнинг ўзи кифоя.

Дирак электрон учун g-фактор 2 га тенг эканлигини олдинданоқ айтди. Бу эса тажрибада асосли қилиб тасдиқланди. Иккинчи жаҳон уруши тугагач, орадан кўп вақт ўтмай, Колумбия университетида электрон g-факторн аниқ ўлчанди, натижада, унинг 2 дан фақат 0,01 миқдоргагина фарқ қилиши аниқландн. Бу миқдор, афтидан, арзимасдек туюлади. Электроннинг аномал магнит моменти деб аталган мазкур фарқ физикларнинг диққат марказнда турарди. Бу борадаги мунозара электроннинг ёруғлик квантларини виртуал ютиши ва тарқатиши билан шарҳлангунга қадар давом эта берди.

Бундай ҳодиса мюонларда ҳам кузатилса-я? 1957 йилда мюоннинг g-фактори катта аниқликда ўлчанди. Умуман, мюоннинг магнит моментини бевосита 0,00001 гача аниқликда ўлчаш кифоя. Афсуски, назария мюоннинг магнит моменти миқдорини олдиндан айтиб беролмайди. У фақат g-фактор миқдорининигина белгилай олади, магнит моментини ҳисоблаш учун эса мюоннинг 0,00001 дан зиёд бўлмаган аниқликда ўлчанадиган массасини билиш муҳим. Шунинг учун мюон g-факторини ҳам 0,00001 аниқликда ўлчаш билан чекланиш кифоя. «g»-факторининг 2 дан фарқи мюон учун 0,001 дан иборат бўлгани учун унинг магнит моменти миқдорини ҳисоблаш тақрибий миқдорни келтириб чиқаради.

Кейинги вақтларда мюон магнит моменти бевосита ўлчанган. Тажриба мюоннинг массаси $206{,}76 \pm 0{,}02$ электрон массасига тенг эканлигини кўрсатди. Бироқ, массанинг ўта аниқ ўлчанганига қарамай, мюоннинг g-фактори ҳозирча 10 процентгача аниқликда белгиланмоқда. Ядро тадқиқотлари Европа ташки-

лоти (ЦЕРН) мюон g-факторини топишнинг ажойиб усулини тақдим этди. Бунинг учун олимлар қарийб уч йил тадқиқот ишлари олиб бордилар. 1961 йили улар g-факторнинг $2{,}001145 \pm 0{,}000022$ га тенг бўлган миқдорини аниқлашга муваффақ бўлишди.

Назарияга кўра, g-факторнинг миқдори 2,001165 га тенг эди. Бундан, мюон бир процентгача аниқликда оғир электронга ўхшаш бўлади, деган ажойиб хулоса чиқариш мумкин. Демак, мюон электроннинг уйғонган ҳолати экан!

Мюон g-факторини ўлчаш яна бир муҳим ҳолатни келтириб чиқарди. Маълум бўлишича, электромагнит ўзаро таъсирлари $7 \cdot 10^{-14}$ *см* гача сақланар экан. Агар узунликларининг элементар кванти мавжуд бўлса, бунда электромагнит ўзаро таъсирларни $2 \cdot 10^{-14}$ *см* дан ошмайди. Шундай қилиб, фазовий квантни излаш 10^{-14} *см* дан кам масофа томон давом эттиради. Мюон жумбоғи мураккаб ҳолга тушиб қолди, уни ҳозирча ҳал қилиб бўлмайди. Мюонлар устида ўтказиладиган янги тадқиқотларга умид боғланади.

Кейинги йилларда элементар зарралар физикасида янгидан жонланиш кузатилмоқда. Бу жонланиш шундан иборатки, у юқори энергияли электронларни нуклонларга таъсир эттиришга асосланган. Нуклонлар электромагнит структурасининг баъзи элементларида нуклон билан боғланган мезон булути, пионлардан ташқари, яна икки янги типли мезонга эга эканлиги физиклар диққатини жалб этди. Текширишлар натижасида нуклон ўзагини қуршаб олган «пўстин» ғоят мураккаб эканлиги аниқланди. Элементар зарралар аввал тахмин қилинганидан ҳам кўпроқ деган ғоя илгари сурилди. Бу мезонлардан бири уч ҳол: мусбат, манфий ва нейтрал ҳолда мавжуд бўлиб, иккита пионга парчаланиши лозим, мезонларнинг иккинчиси ёса нейтрал формада бўлиши ва учта пионга парчаланиши лозим.

Янги мезонлар ғоят қисқа вақт, яъни 10^{-22} *сек* яшайди, шунинг учун уларни емирилишнинг сўнгги маҳсулларидангина топиш мумкин.

50-§. ЭЛЕМЕНТАР ЗАРРАЛАРНИНГ ЎЗАРО ТАЪСИРЛАШУВИ ВА УНДАГИ САҚЛАНИШ ҚОНУНЛАРИ

Элементар зарраларнинг ўзаро таъсирлашуви уларнинг бир-бирига айланишига олиб келади. Хусусан, бу ўзгариш зарранинг бир неча енгилроқ заррага ўз-ўзидан емирилишидан иборат бўлиши мумкин. Фотон, электрон ва μ-мезон нейтринолари, протон ҳамда буларга тегишли антизарралар барқарордир. Ўз-ўзидан емирилиш, ўрта ҳисобда, ҳар бир зарра учун характерли бўлган бирор вақт ўтгандан сўнг содир бўлади ва бу вақт ўртача яшаш вақти дейилади. Ўз-ўзидан емирилишдан ташқари ўзаро таъсирлашув зарралар бир-бири билан учрашганида ҳам содир бўлиши мумкин.

Юқорида айтиб ўтганимиздек, ҳозирги вақтда ўзаро таъсирнинг электромагнит, кучли, заиф ва гравитацион ўзаро таъсирлари маълум. Электромагнит ўзаро таъсирида фотонлар ва электр зарядига эга бўлган ҳамма зарралар иштирок этади. Бу ўзаро таъсир шундан иборатки, бунда зарядланган зарра ўз атрофида электромагнит майдони ҳосил қилади — фотонлар чиқаради. Кейинчалик фотонлар бошқа зарядланган зарра томонидан ютилиши мумкин (бу заррага электромагнит майдон таъсир қилди). Фотонларни чиқарганда ва ютганда зарядланган зарра ўзгармай қолган ҳолда фақат ўз тезлигини (кинетик энергиясини) ўзгартиради.

Кучли ўзаро таъсирлашувда барионлар ва мезонлар иштирок этади. Барионлар ўзидан мезонлар чиқаради (атрофида мезон майдонини ҳосил қиладн) ва уларни ютади (мезон майдонининг таъсирига учрайди). Атом ядроларининг нуклонлари орасида таъсир қилувчи ядро кучлари кучли ўзаро таъсирга мисол бўла олади.

Фотонлардан бошқа ҳамма зарраларда заиф (кучсиз) ўзаро таъсир бўлади. Масалан, π^0- ва η^0- мезонлар икки фотонга парчаланишидан ташқари барча бошқа зарраларнинг парчаланишлари заиф ўзаро таъсирдан келиб чиқади.

Ўзаро таъсирнинг тўрт хилга бўлиниши бу ўзаро таъсирлар натижасида бўладиган жараёнлар эҳтимоллигининг характерли катталиги (интенсивлиги)га боглиқ. Энергия ~ 100 *Мэв* ва бошқа шароитлар турлича бўлганда кучли, электромагнит ва заиф процессларнинг эҳтимоллиги тахминан $1:10^{-2}:10^{-4}$ каби нисбатда бўлади; энергиялар бошқача бўлганда бу нисбатлар бирмунча ўзгариши мумкин.

Зарралар ўртасидаги гравитацион ўзаро таъсир шу қадар озки, элементар зарралар назариясида у умуман ҳисобга олинмайди.

Элементар зарраларни ўрганишда ўзаро таъсирлашувларнинг ўзи эмас, балки зарралар ўзаро таъсиргача ва ўзаро таъсирнинг ўзига нисбатан узоқроқ вақт ўтгандан сўнг кузатилади. Бу кузатиш ўзаро таъсирлашув содир бўлган жойдан узоқ масофада амалга оширилади. Ўзаро таъсир характери ҳақида, зарранинг ўзаро таъсирлашув содир бўлган жойдан кузатиш жойигача ҳаракат қилган вақт давомида ўзгармай қолган катталикларга қараб фикр юритишга тўгри келади. Шунинг учун элементар зарраларнинг ўзаро таъсирини ўрганишда сақланиш қонунлари катта роль ўйнайди. Бу қонунлар бир зарранинг бошқа заррага айланиши мумкинлигини қатъий чеклайди. Сақланиш қонунини қаноатлантирмайдиган бирор ўзгаришлар содир бўлмайди ва, аксинча, агар маълум бўлган сақланиш қонунлари томонидан «рухсат этилган» қандайдир ўзгаришлар табиатда кузатилмаса, демак, бирор физик катталикнинг ҳали бизга номаълум бўлган ва бундай ўзгаришларда бузиладиган сақланиш қонуни мавжуд экан.

Ҳаракатни характерловчи катталикларга энергиянинг, ҳаракат миқдорининг (импульснинг) ва ҳаракат миқдори моментининг сақланиш қонунлари тегишлидир. Энергиянинг сақланиш қонунини қўлланганда, зарранинг хусусий энергиясини («тинчлик»даги массасини) ҳам эътиборга олиш керак. Масалан, протоннинг тинчликдаги массаси нейтроннинкидан кичик. Шунинг учун эркин протон β^+емирилиши, яъни нейтрон, позитрон ва нейтринога айланиши мумкин эмас.

Элементар зарралар системасининг тўлиқ ҳаракат миқдори моменти зарраларнинг траектория бўйлаб қиладиган ҳаракати натижасида келиб чиқадиган орбитал ҳаракат миқдори моменти ва спинлар (зарраларнинг хусусий ҳаракат миқдори моменти) нинг йиғиндисидан иборат. Ўзаро таъсирлашувларда тўлиқ ҳаракат миқдори моменти сақланади. Масалан, электрон атомда бир энергетик сатҳдан иккинчисига ўтганда тўлиқ ҳаракат миқдори моменти бир бирликка ўзгаради, бунда спини 1 га тенг бўлган фотон нурланиб чиқади.

Элементар зарраларнинг ҳар қандай ўзгаришларида бошқа тўртта сақланиш қонунлари ҳам бажарилиб, зарраларнинг заряд номларига эга бўлган хусусиятларига — электр зарядига, барион, электронлик ва μ-мезонлик лептон зарядларига тегишлидир. Бу қонунларга биноан элементар зарраларнинг ҳар қандай ўзгаришида бу зарядларнинг ҳар бирининг алгебраик йиғиндиси ўзгармай қолади. Масалан, эркин нейтроннинг β^--емирилишини, яъни нейтроннинг протонга, электронга ва электрон нейтриносига айланишини кўриб чиқайлик ($n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$). Энергиянинг сақланиш қонуни бу ўзгаришга тўсқинлик қилмайди, чунки нейтроннинг массаси (хусусий энергияси) протон ва электрон массаларининг йиғиндисидан катта, антинейтринонинг массаси нолга тенг, ортиқча энергия эса, емирилиш маҳсулотларининг кинетик энергиясига айланади. Ҳаракат миқдори моментининг сақланиш қонуни ҳам бажарилади: нейтроннинг спини $\frac{1}{2}$, емирилиш натижасида учта $\frac{1}{2}$ спинлик зарра ҳосил бўлади, улардан иккитасининг спини бир томонга, биттасиники эса қарама-қарши томонга йўналган, яъни емирилиш маҳсулотлари спинларининг йиғиндиси ҳам $\frac{1}{2}$ га тенг (емирилиш содир бўлган нуқтага нисбатан емирилишгача ва ундан кейинги орбитал ҳаракат миқдори моменти нолга тенг). Нейтроннинг электр заряди нолга тенг. Емирилишдан кейин мусбат зарядланган протон, манфий зарядланган электрон ва электр зарядига эга бўлмаган нейтрино ҳосил бўлади, бунда ҳам емирилиш маҳсулотининг умумий заряди нолга тенг. Нейтроннинг барион заряди $+1$. Емирилиш маҳсулотлари орасида бўлган протоннинг ҳам барион заряди $+1$, бошқа зарралар эса барион зарядига эга эмас. Шуни айтиб ўтиш керакки, протон барион зарядига эга бўлган энг енгил зарradир, шунинг учун унинг енгилроқ зарра-

ларга емирилиши мумкин эмас. Шундай қилиб, протоннинг барқарорлигини барион зарядининг сақланиш қонунига асосланиб ҳам тушунтириш мумкин.

Емирилишгача лептон-электрон оиласига тегишли зарра йўқ эди. Емирилишдан кейин эса бундай зарралардан иккитаси пайдо бўлди: электрон-лептон заряди +1 бўлган электрон ва электрон-лептон заряди — 1 бўлган антинейтрино, яъни электрон-лептон зарядларининг йиғиндиси яна нолга тенг.

Ажиб (ғалати) зарралар ва резонанслар. К-мезонлар, гиперонлар (λ-, Σ-, Ξ- ва Ω- зарралар) тез π- мезонлар ва протонларнинг атом ядролари билан ўзаро таъсири натижасида пайдо бўлади. Уларнинг тажрибада топилган ҳосил бўлиш эҳтимоллиги кучли ўзаро таъсирга мос келади. Сўнгра ҳар бир гиперон барион ёки π-мезонларга, К-мезон эса π-мезонларга, яъни кучли ўзаро таъсирда иштирок этувчи зарраларга емирилади. Шунинг учун уларнинг емирилиши кучли ўзаро таъсир натижасида содир бўлади, деб ҳисоблашга барча асослар бор. Бироқ бу ҳолда бундай зарраларнинг яшаш вақти 10^{-22} *сек* атрофида бўлиши, яъни ёруғлик тезлиги билан ҳаракат қилувчи зарранинг 10^{-12} *см* (тахминан ядро ўлчами) масофани босиб ўтиш вақтига мос келиши керак. Аслида эса, бу зарраларнинг тажрибада аниқланган яшаш вақтлари тахминан 10^{-10} *сек* (5- жадвал). Бундай яшаш вақтлари кучли ўзаро таъсирга эмас, балки заиф ўзаро таъсирга мос келади. Бу зарраларнинг пайдо бўлиш эҳтимоллигининг катталиги ва емирилиш эҳтимоллигининг нисбатан кичиклиги ўртасидаги қарама-қаршилик бу зарраларни ўрганишнинг биринчи босқичида ғалати бўлиб туйилди. Бу қарама-қаршиликни тушунтириш учун гиперонларга ва *К*-мезонларга аввал қизил билан, кейин эса жиддий равишда ажиблик деган хусусият беришга тўғри келди. Ажибликнинг катталиги квант сони *S* билан белгиланади, 5- жадвалда ҳар бир зарра учун унинг қиймати келтирилган. Антизарраларнинг ажиблиги қиймат жиҳатидан тегишли зарраларни ажиблигига тенг, лекин қарама-қарши ишоралидир.

Кучли ўзаро таъсирларда тўлиқ ажиблик ўзгармайди, ўзаро заиф таъсирларда эса ўзгаради деб, қисоблашга тўғри келди, яъни юқорида айтиб ўтилган (энергия, импульс, электр ва барион заряди ва ҳ.к.) сақланиш қонунларидан фарқли ўлароқ, фақат ўзаро кучли таъсирларда бажариладиган сақланиш қонуни мавжуд. Шундай қилиб, Σ^+- зарранинг кучли ўзаро таъсир натижасида протонга ва π^0- мезонга емирилиши ажибликнинг сақланиш қонуни томонидан тақиқланади (Σ^+- зарранинг ажиблиги—1, протон ва π^0-мезоннинг ажиблиги эса ноль). Шу билан бирга Σ^+-зарра Λ^0-заррага ва π^+- мезонга емирилиши мумкин эмас, чунки ажиблик сақланса ҳам, энергиянинг сақланиш қонуни бажарилмайди (Λ^c- зарра ва π^+- мезон массаларининг йиғиндиси Σ^+- зарранинг массасидан катта). Бироқ сақланиш қонунлари кучсиз ўзаро таъсир натижасида бўладиган $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^+$ емирилишини тақиқламайди ва бундай емирилиш амалда юз беради.

Бошқа томондан, ажибликнинг сақланиш қонуни оддий (ажиб бўлмаган) зарралар — протон ва π-мезонларнинг ўзаро таъсирида нима учун ажиб зарраларнинг группа-группа бўлиб пайдо бўлишини тушунтиради. Масалан, протонларнинг тўқнашувида иккита ажиб зарра Λ° ва K^+ ҳосил бўлиши мумкин ($p+p \to \Lambda^\circ + K^+ + p$), бунда ажиблик ўзаро таъсирлашувгача ҳам, ундан кейин ҳам нолга тенг (Λ° — зарранинг ажиблиги — 1, K^+-мезоннинг ажиблиги эса + 1).

Бирор барионнинг ҳамма хусусиятларига эга бўлган ва шу билан бирга массаси етарлича катта бўлган зарраларнинг ўзаро кучли таъсир натижасида енгилроқ барионларга ва мезонларга емирилишини энергиянинг ва ажибликнинг сақланиш қонунлари тақиқлайди. Албатта, бундай зарраларнинг яшаш вақти жуда кичик бўлиши керак. Шунинг учун уларнинг мавжудлиги ҳақида фақат ёрдамчи белгиларга, масалан, емирилиш маҳсулотлари энергияларининг ва импульсларининг ўзаро муносабатларига қараб гапириш мумкин. Бундай зарралар ҳақиқатан тажрибада топилган эди. Уларни резонанслар деб аталади. «Резонанс» деган ном резонанслар ҳосил бўлиш эҳтимоллигининг уларни ҳосил қилувчи протоннинг маълум энергиясида кескин ўсишига боғлиқ. Резонанслар кучли ўзаро таъсир қилувчи зарраларнинг ҳар бир группасида бор. Ҳозирги вақтда бундай зарралар кўп.

Элементар зарраларнинг тузилиши ҳақида. Мураккаб системаларнинг (атомларнинг, молекулаларнинг) таркибий қисми бўлган зарраларни «элементар» деб аталиши уларнинг таркибий қисмларга бўлиниши мумкин эмаслигини билдиради. Албатта, бундай аталиши шартлидир. Эслатиб ўтамизки, фан тараққиётининг маълум босқичида атомлар бўлинмас зарралар деб ҳисобланар эди. Кейинчалик атомнинг мураккаб тузилишга эга эканлиги маълум бўлди.

Элементар зарраларни ҳам атомлар каби мураккаб тузилишга эга деб тахмин қилишга барча асослар бор. Кейинги йилларда юқори энергияли электронларнинг водород ва дейтерий ядроларида сочилишига доир тажрибалар ўтказилди. Протон ва нейтрон — $0{,}8 \cdot 10^{-13}$ *см* радиусли соҳада тарқалган электр зарядларидан иборат (нейтронда мусбат ва манфий зарядлар ўзаро тенг ва концентрик қатламларда жойлашган) деб ҳисоблаб, ўтказилган тажриба натижаларини тушунтириш мумкин. Нуклонлар зарядининг тақсимотини ва, шунингдек, уларнинг магнит моментини тушунтириш учун нуклонлар кери деб аталувчи жуда кичик «ядро»дан ва унинг атрофидаги мезонлар булутидан иборат деган модел таклиф қилинади.

Шу каби ҳамма элементар зарралар электр заряди $\frac{1}{3}$ ва $\frac{2}{3}$ га, спини эса $\frac{1}{2}$ га тенг бўлган кварклар (кваркларнинг уч хили ва уларга тегишли антикварклари)дан иборат деган гипотеза мавжуддир.

Шуни айтиш керакки, «иборат» деган сўз нарсаларнинг ҳақиқий ҳолатини ифодалайди. Агар зарра бирор заррага емирилса, бу емирилиш маҳсулотлари емирилувчи заррада таркибий қисмлар шаклида мавжуд бўлган дейиш мумкин эмас. Ҳақиқатан ҳам, бир зарранинг ўзи кўпинча ҳар хил йўллар билан емирилади. Масалан, атомда электрон бир сатҳдан иккинчи сатҳга ўтганда фотон чиқаради; унинг тўлқин узунлиги ва ўлчамлари электрон ва атом ўлчамларидан кўп марта катта. Шунинг учун фотон электроннинг таркибий қисми сифатида унинг ичида эди, дейиш мумкин эмас. Шундай қилиб, ҳозиргача элементар зарраларнинг тузилишини қандай тушуниш кераклиги тўла равшан эмас.

VII боб

ИОНЛАШТИРУВЧИ НУРЛАНИШНИ УРГАНИШ УСУЛЛАРИ

51-§. НУРЛАНИШНИНГ МОДДА ОРҚАЛИ ЎТИШИ

Энергияси етарлича бўлган зарядланган зарра модда орқали ўтаётганда унинг атомлари билан тўқнашади. Атом ионлаштирувчи нурлар учун нисбатан катта ўлчамларга эга бўлган нишондан иборат. Аммо бу нишон бутунича планетар электронлар булути билан қопланган бўлиб, ядро эса атом марказидаги жуда кичик соҳани эгаллаб туради, холос.

Бинобарин, зарядланган зарранинг атом билан тўқнашишини унинг электронлари билан тўқнашишидан иборат деб ҳисоблаш мумкин, зарранинг электронлар булути билан тўсилган ядро билан тўқнашиши шунчалик кам учрайдиган ҳодисаки, кўп ҳолларда буни ҳисобга олмаса ҳам бўлади.

Ҳақиқатда эса электронлар жуда кичик зарра бўлишига қарамасдан, улар билан зарядланган зарранинг тўқнашиш ҳодисаси тез бўлиб туришига ажабланиш мумкин. Аммо, зарядланган икки зарра электр кучлари мавжудлиги туфайли анчагина узоқ масофадан туриб ҳам ўзаро таъсирлаша олади. Агар зарралар қарама-қарши зарядланган бўлса, электр кучлари тортишувчи, бир хил зарядланган бўлса, итаришувчи кучлар бўлади. Электрон зарядланган зарра билан тўқнашаётганда макроскопик жисмга хос хусусиятларни намойиш қилади.

Зарядланган зарра тўқнашганда ўз энергиясининг бир қисмини электронга беради; бунинг натижасида электрон ўз атомининг узоқроқ бирор орбитасига ўтади. Электрон тўқнашиш вақтида қанча кўп энергия олса, янги орбита ядродан шунча узоқ бўлади. Атом уйғонган ҳолатга ўтади. Электрон тўқнашганда жуда қисқа муддатдан сўнг ўзи олган энергияни нур сифатида чиқариб, бошланғич орбитасига қайтади. Агар тўқнашиш пайтида зарядланган заррадан олинган энергия электроннинг ядро билан боғланиш энергиясидан катта бўлса, электрон атомдан уриб чиқарилади ва атом мусбат зарядли (ион)бўлиб қолади, яъни ионлашади.

Зарядланган зарра модда орқали ўтаётганда ўз йўлида уйғонган атомлар, электронлар ва ионлардан иборат из қолдиради. Бу из зарра ўтганлигининг «гувоҳи»дир. Бу изни вужудга келтирган зарранинг хусусиятлари тўғрисида маълум фикрга келиш мумкин.

Зарядланган зарра модда орқали ўтаётганида ўз энергиясини йўқотади ва пировардида сингувчанлик хусусиятини тўла йўқотади. Бошланғич энергияси бир хил бўлган ва бир хил материал орқали ўтаётган ҳар хил зарраларнинг ҳаракатдаги массаси қанча катта бўлса, шунча кўп ионлашган атомлар ҳосил қилиши тажрибада тасдиқланган. Бинобарин, битта α-зарра ўшанча бошланғич энергияга эга бўлган битта электронга нисбатан кўпроқ атомларни ионлаши керак. Масалан, полонийдан чиққан битта α-зарра нормал босим ва нормал температурада, ҳавода, 1 *см* да тахминан 40 минг жуфт ион ҳосил қилади. Ҳар гал тўқнашганда α-зарра ўз энергиясининг бир қисмини берганлиги учун у тобора секинлашади ва, ниҳоят, бир неча сантиметрдан кейин тўхтайди. Ўшанча бошланғич энергияга эга бўлган электрон шу ҳавода 1 *см* йўлда ҳаммаси бўлиб 50 жуфт ион ҳосил қилади ва, албатта, α-заррага қараганда анча катта сингувчанликка эга.

Биз биламизки, γ-нурлар ҳам ёруғлик тўлқинлари, ультра қисқа ва рентген нурлари каби электромагнит нурланишдан иборат. У катта частотага эга бўлган электромагнит нурланишдир.

Ёруғлик — ультрақисқа ва рентген нурлари атомнинг планетар электронларидан бири узоқроқ жойлашган орбитадан яқинроғига ўтганда чиқадиган квантлар (фотонлар)дан иборат. γ-нурлар чиққанда эса ҳодиса анча мураккаб бўлади, чунки бу нурлар ядродан чиқади. Гамма-нурланиш ҳам фотонлардан иборат бўлиб, бу фотонлар ядро бир квант ҳолатидан кичикроқ энергияли иккинчи бир ҳолатга ўтганида чиқади.

Модда орқали юқори энергияли фотон ўтаётганда нималар бўлишини кўриб ўтайлик. У энергиясини йўқотади ва асосан қуйидаги уч хил процесслар: фотоэлектрик эффект, комптон эффекти ва электрон-позитрон жуфтлари воситасида ион жуфтлари ҳосил қилади. Бу процесслардан бирининг амалга ошиши фотоннинг энергиясига ва у ўтаётган модданинг атом огирлигига боғлиқ.

Агар атом билан тўқнашадиган фотон атомни ионлаш учун етарли даражада катта энергияга эга бўлса, атомнинг планетар электронларидан бири ўз орбитасидан узилиб чиқади ва ядродан фотон энергияси билан электрон уриб чиқариш учун сарф қилинадиган энергия орасидаги айирмага тенг бўлган энергия билан узоқлашади. Атомнинг фотонни ютиши ва электрон уриб чиқарилишидан иборат бўлган бу процесс фотоэлектрик эффектдир.

Агар атом билан тўқнашувчи фотон атом электронларининг ядро билан боғланиш энергиясини ҳисобга олмаслик мумкин бўладиган даражада катта энергияга эга бўлса, процесс худди γ-квант ядро билан боғланган электронга эмас, балки эркин электронга келиб урилгани каби бўлади. Бу фотон билан электроннинг эластик тўқнашувига ўхшайди. Худди бильярд ўйинини эслатадиган ҳодиса содир бўлади: бир шарни тинч турган бошқа

шар томонга думалатнлади; тўқнашганидан кейин биринчи шар янги йўналишда секинроқ ҳаракат қилади, тинч турган шар эса қандайдир тезлик олиб ҳаракатланади. Биринчи шар тўқнашиш натижасида ўз энергиясининг бир қисмини иккинчисига берди. Шунга ўхшаш фотон ҳам электрон билан тўқнашиб ўз траекторнясидан четга чиқади ва электронга берган энергиясига тенг энергияни йўқотади; шунинг учун фотон бошланғич энергиясидан кичикроқ энергия билан сочилади.

Фотон энергияси унинг частотаси билан $E=h\nu$ муносабат орқали боғланганлигини эсласак, сочилган фотон бошлангич фотонга қараганда кичик частотага эга эканлигини кўрамиз. 1923 йилда Америка физиги Артур Комптон очган ва Комптон эффекти деб аталадиган эффект худди шундан иборат. У рентген нурлари дастаси модда орқали ўтганда нурларнинг бир қисми барча йўналишларда сочилишини кузатди (ёруғлик лойқа муҳитдан ўтганда бўлгани каби). Лекин бу сочилган нурнинг частоталари тушаётган нурникидан кичикроқ бўлади. Фақат классик назария аппаратидан фойдаланиб Комптон эффектини тушунтириш мумкин эмас: у квантлар фаразиясининг ажойиб тасдиғидир. Тушаётган фотон энергиясини аниқлашда элемент қанча енгил бўлса, Комптон эффекти шунча яққолроқ намоён бўлади. Енгил атомларнинг ядролари кичик электр зарядларга эга бўлиб, электронларни ядро билан кучсизроқ боғлангандир; улар кўпроқ эркин электронларга ўхшаб кетади.

Модда орқали электромагнит нурланиш ўтаётганида унда ё фотоэффект, ёки Комптон эффекти рўй беради. Бу тушаётган фотонлар энергиясига (частотасига) ва муҳитнинг зичлигига (атом номерига) боғлиқ.

Фотон модда орқали ўтганда вужудга келадиган ва энергия сарфланишига сабаб бўладиган учинчи ҳодиса электрон-позитрон жуфтининг ҳосил бўлишидир. Бунда фотон жуда юксак энергияга эга бўлиб, тўлқин узунлиги сантиметрнинг ўн миллиарддан бир улушига тенг бўлиши керак. Бу ҳодиса фақат фотон ядронинг электр майдонини кесиб ўтганда юз бериши аниқланган.

Бинобарин, электромагнит нурланишлари зарядланган зарралар каби ўз йўлидаги ядроларни уйготади ва модда атомларини ионлаштиради. Уйғониш ва ионланиш биз бевосита ўрганадиган предметдир. Уларни қайд қилиш учун ҳар хил усуллар бўлиб, биз уларни уч группага бўламиз.

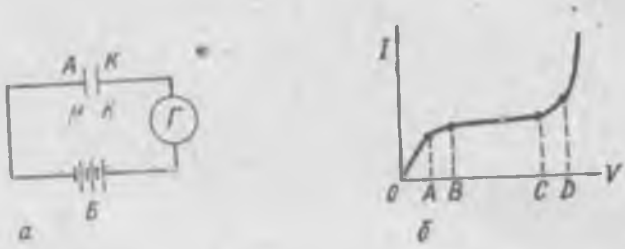
Қайд қилувчи асбобларнинг биринчи группаси зарядланган зарралар газ орқали ўтганида уларнинг ионлаштириш хоссасига асосланган.

Иккинчи группа эса (фотоэмульсияли пластинкалар, кристалли счётчиклар) зарядланган зарранинг бромли кумуш кристалларини ионлаштириш ёки қандайдир ярим ўтказгич кристалини ионлаштириб, унинг электр ўтказувчанлигини кескин ўзгартира олиш хоссасига асосланган.

Учинчи группа (сцинтилляцион счётчиклар, Черенков счётчиклари) зарядланган зарра вужудга келтирадиган флуоресценциядан ёки модда орқали зарра ўтганда чиқадиган Черенков нурланишидан фойдаланади.

52-§. ИОНЛАШТИРУВЧИ НУРЛАНИШНИ УРГАНИШ

Энг оддий ионизацион камера маълум босим остидаги газ билан тўлдирилган ёпиқ идишдан иборат бўлиб, ичидаги электродлар ўртасида электр майдони ҳосил қилинади.



30-расм. Ионизацион камера: а) оддий уланиш схемаси; б) Вольт — ампер характеристикаси.

Ионизацион камеранинг уланиш схемаси 30-*а* расмда кўрсатилган. Схемада: *ИК* — ионизацион камера, *А* ва *К* — унинг электродлари, *Б* — электродлар ўртасида потенциаллар айирмасини вужудга келтирувчи манба, *Г* — ионизацион токни ўлчаш асбоби. Баъзи бир ионизацион камераларда электродларнинг бири сифатида камеранинг девори, иккинчиси сифатида эса идишга жойлаштирилган сим ёки стержендан фойдаланилади.

Электродлар ўртасидаги газ нормал шароитда диэлектриклик хусусиятига эга бўлгани учун электр токини ўтказмайди. Агар зарра *А* ва *К* электродлар ўртасидан ўтса, идишдаги газ ионлашади, яъни унда эркин электронлар ва мусбат ионлар ҳосил бўлади. Эркин электронлар ва мусбат ионлар электр майдони таъсирида ҳаракатга келиб, занжирда электр токини вужудга келтиради. Бу токни сезгир *Г* — гальванометр билан ўлчанади.

Ионлаштирувчи факторнинг доимий интенсивлигида *А* ва *К* ўртасидаги потенциаллар айирмасини нолдан бошлаб оширсак, ионизацион ток миқдори ўзгаради. Токнинг кучланишга боғлиқлиги 30-*б* расмда кўрсатилган. Графикнинг *ОА* — қисмида ток электродлар орасидаги *V* кучланишга деярли пропорционал равишда ортади (30-*б* расм). *ВС* қисмидаги кучланишнинг ортиши токни ўзгартирмайди, чунки вужудга келган ионларнинг ҳеч бири рекомбинацияга учрамай ҳаммаси электродларга етиб келади. Бу ҳолдаги ток тўйиниш токи дейилади. Тўйиниш токи ионлаштирувчи факторнинг интенсивлигига — зарралар сонига

(ёки γ-квантлар сонига) пропорционал. *СД* қисмида *V* ортиши билан ток яна ҳам ортади, чунки *V* кучланиш таъсирида электрон ва ионлар шундай катта тезлик оладиларки, улар газ атомлари ва молекулалари билан тўқнашиб уларни ионлаштиради. Электронлар ва ионларнинг умумий сони жаласимон кўпаяди, ток кескин ортиб, газ кучайтириши деган ҳодиса юз беради. *V* ни янада оширсак, электродлар ўртасида газ пробойи юз беради.

Ионизацион камера газ кучайтириши бўлмаган тўйиниш токи режимида ишлайди. Бу ҳолда ионизацион камерага келиб тушадиган зарядланган зарра таъсирида вужудга келадиган жуфт ионлар сони нисбатан кам бўлиб, газ кучайтириши бўлмаган ҳолда камера ёрдамида алоҳида зарраларни қайд қилиш жуда қийин. Газ кучайтириши режимида ионизацион камера алоҳида зарраларнинг счётчиги сифатида ишлай олади. Шунинг учун одатда ионизацион камералар икки хилга бўлинади: камерадан ўтаётган алоҳида зарранн қайд қиладиган ҳисобчи — ионизацион камералар ва зарралар оқимининг интенсивлигини ўлчайдиган интеграл ионизацион камералар. Вазифасига қараб ионизацион камералар электродларининг шакли текис, сферик ёки цилиндрик конденсатор кўринишида бўлади. Ўлчамлари эса жуда хилма-хил — куб миллиметрлардан тортиб юзлаб литргача бўлади. Ионизацион камералар кўпгина техник асбобларнинг: рентгенометрлар, дозиметрлар ва ҳ. к. ларнинг таркибий қисмига киради.

Зарядланган зарралар счётчиклари ядро физикаси тадқиқотларида кенг тарқалган бўлиб, улар алоҳида зарядланган зарраларни кузатиш ва қайд қилиш учун ишлатилади.

Счётчиклар ишлаш принципига қараб тўрт группага бўлинади: ионизацион, ярим ўтказгичли (кристалли), сцинтилляцион ва Черенков счётчиклари.

Ҳар бир группа ҳақида қисқача тўхтаб ўтамиз.

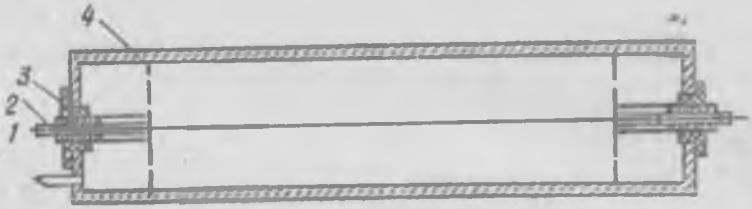
Ионизацион счётчиклар: бу группага пропорционал счётчиклар ва мустақил разрядли Гейгер — Мюллер счётчиклари киради.

Пропорционал счётчиклар: агар ионизацион камера тўйиниш токи режимида ишласа, унинг алоҳида зарраларга нисбатан сезгирлиги катта эмас. Агар ионизацион камера газ кучайтириш режимида ишласа, сезгирлиги анча ортади. Катта кучланишлар соҳасида (30-*б* расмдаги *СД* қисми) зарбалик ионизация натижасида жуфт ионлар сони жаласимон кўпаяди ва зарра томонидан ҳосил қилинган бирламчи n_0 жуфт ион kn_0 жуфт ионга айланади, бунда k — газ кучайтириш коэффициенти. Электродлар ўртасидаги кучланиш ортиши билан газ кучайтириш коэффициенти ортади. .

Бошланишда k катталик ионлаштирувчи зарра вужудга келтирган бирламчи ионлар сонига боғлиқ эмас. *V* ни янада орттирилса, k кучайтириш коэффициенти n_0 нинг ортиши билан ка-

маяди. k коэффициентининг n_0 га боғлиқ бўлмаган газ кучайтириш соҳаси пропорционал счётчикларда фойдаланилади. Бу ҳолда счётикдан олинаётган импульснинг катталиги учиб кирган зарра вужудга келтирган бирламчи ионлар сони n_0 га пропорционал бўлади. Олдин ҳосил бўлган жуфт ионлар сони n_0 ва, демак, kn_0 ҳам зарранинг счётчикдаги газни ионлаштириш учун сарфлаган энергиясига пропорционалдир.

Шунинг учун зарра счётчик орқали ўтганда вужудга келадиган ионизацион токнинг миқдори ҳам энергияга пропорционалдир. Шундай қилиб пропорционал счётчиклар ёрдамида фақатгина зарранинг счётчик орқали ўтганлиги тўғрисидаги фактни тасдиқлаш эмас, балки унинг энергиясини ҳам баҳолашимиз мумкин.



31- расм. Цилиндрик счётчикнинг схематик кўриниши:
1 — йиғувчи электрод, *2* — сақлагич ҳалқа, *3* — изолятор, *4* — корпус.

Счётчикнинг тузилиши содда бўлиб (31- расм), ўртасидан ингичка яланғоч сим толаси тортилган металл ёки шишадан қилинган цилиндр шаклидаги идишдан иборат. Симнинг диаметри одатда 1 *мм* дан ошмайди ва у цилиндр идишдан изолятор — «3» ёрдамида жуда яхши изоляцияланган бўлиб, қаршилик орқали ерга уланган бўлади. Цилиндрик идиш маълум босим остида газ (ёки газлар аралашмаси) билан тўлдирилган бўлади. Сим-*1* (счётчикнинг йиғувчи электроди) ва корпус-*4* (счётикнинг катоди) ўртасига тахминан 10^2—10^3 вольт потенциаллар айирмаси берилади. Сим толасининг яқинида кучли электр майдони ҳосил бўлади ва худди шу соҳада газ кучайтириш юз беради. Газ кучайтириш коэффициенти одатда 10^4 дан ошмайди.

Пропорционал счётчикларда разрядланиш процесси мустақил бўлмай, газ кучайтиришида ҳосил бўлган барча электрон ва ионлар электродларга етиб боргандагина тугайди. Процессининг давомлилиги ионларнинг силжиш тезлигига ва цилиндрнинг ўлчамига боғлиқ бўлиб, тахминан 10^{-4} секунд бўлади.

Гейгер — Мюллер счётчиклари. Юқорида баён қилинган пропорционал счётчикнинг сим толаси ва девори (корпуси) орасидаги кучланишни янада оширсак, счётчикка тушаётган зарра газда мустақил разрядни ва разряд катта импульсли токни вужудга келтиради. Гейгер — Мюллер счётчикларининг тузилиши ва ишлаши пропорционал счётчикларга ўхшашдир. Счётчик

электродларига 0,8—3 *кв* кучланиш берилади. Кўпчилик ҳолларда счётчик аргон, ҳаво аралашмаси ёки спирт буғлари билан 0,1 атмосфера босим остида тўлдирилади. Ионлаштирувчи зарра счётчик орқали ўтганда счётчик ичидаги газ ионлашади. Ҳосил бўлган ионлар кучланиш таъсири остида цилиндр деворлари томонига, электронлар эса симга (йиғувчи электродга) томон ҳаракат қилади. Сим атрофидаги кучли майдон соҳасида электронлар шундай катта энергияга эга бўладики, улар ўзларининг тўқнашишлари натижасида газнинг янгидан-янги атомларини ионлаштиради. Ионлар сони жалаимон ортади, счётчикдаги газда электр разряд, занжирда эса ток импульси ҳосил бўлади.

Симнинг яқинида кўп миқдорда кичик ҳаракатчанликка эга бўлган мусбат ионлар ҳосил бўлиб, сим атрофида фазовий мусбат зарядни вужудга келтиради. Бу зарядниг таъсири счётчик электродлари ўртасидаги электр майдон кучланганлигини сусайтиради, натижада разряд тўхтайди. Бир қанча вақтдан кейин (бу вақт ичида фазовий зарядниг мусбат ионлари катодга етиб боради) счётчикдаги кучланиш яна олдинги қийматига эришади ва счётчик янги заррани қайд қилишга тайёр бўлади.

Счётчикнинг вақт бирлиги ичида қайд қила оладиган энг кўп зарралар сони счётчикнинг ажрата олиш қобилияти деб аталади. Бу счётчикдаги физик процессларни давомлилигига боғлиқ бўлади. Ҳар хил счётчикларнинг ажрата олиш қобилияти секундига 10^3 дан 10^{10} та заррагача бўлади. Счётчикнинг ажрата олиш қобилияти бундан ташқари электродларга қўйилган кучланишга ҳам боглиқ. Одатда счётчиклар *ВС* соҳасининг ўртасига тўғри келадиган режимда ишлайди.

Қандай зарраларни қайд қилишга мўлжалланганлигига қараб Гейгер — Мюллер счётчиклари ҳар хил конструкцияга эга бўлади.

Алоҳида олинган счётчик фақат зарранинг счётик орқали ўтганлигинигина қайд қилишга имкон беради. Қандайдир бир зарранинг ҳаракатини кузатиш, ҳаракат йўналишини аниқлаш учун одатда кетма-кет қўйилган махсус радиотехник «мослашишлар» ёки «антимослашишлар» схемалари бўйича уланган счётчиклар системаси ишлатилади. Мослашишлар схемаси бўйича уланган икки ёки бир неча счётчик орқали зарядланган зарра ўтганда счётчиклар ишлайди ва зарра қайд қилинади.

Агар зарра фақат бир счётчикдан ўтиб, қолганларидан ўтмаса, система ишламайди. Бу фақат маълум йўналишда ҳаракат қилаётган заррани кузатиш имконини беради. Мосламалар схемаси бўйича уланган счётчиклар системаси космик нурлар физикаси, атом ва ядро физикасида худди телескопга ўхшаш вазифани бажаради.

Сцинтилляцион счётчиклар. Зарранинг модда молекулаларини ионлаш ва қўзғатиш учун сарфланган энергияси иссиқликка айланади. Бундан флуоресценцияланувчи моддалар истисноднр.

Улар ютилган энергиянинг бир қисмини ёруглик учқунига (сцинтиляцияга) айлантиради. Фосфор чиқараётган ёруғлик энергиясини зарранинг ютилган энергиясига нисбати фосфорнинг конверсион қобилияти деб айтилади.

Сцинтилляцион счётчик асосан икки элементдан суюқ ёки қаттиқ фосфордан қилинган сцинтиллятордан ва фотоумножителдан иборат. Фосфорга унинг корверсион қобилиятини оширадиган активатор (активловчи модда)нинг кичик аралашмаси қўшилади. Активловчи модда фосфорнинг символик белгисидан кейин қавс ичида ёзилади. Масалан, NaI(Tl) — ёзув натрий иодит талний билан активлаштирилганлигини кўрсатади. Сцинтиллятор чиқараётган ёруглик учқунининг бир қисми фотоумножителнинг катодига тушади ва ундан фото-электронларни урнб чиқаради.

Фотоумножитель трубкасида динод деб аталадиган 8—13 та электрод бўлади. Катод ва анод орасидаги кучланиш 1500—2500 *в* чамасида бўлиб, бу қаршиликлар системаси орқали динодлар ўртасида тақсимланади. Электр майдони томонидан 150—200 *эв* гача тезлатилган фотоэлектронлар биринчи динодниигг сиртига урилиб ундан ўртача $\sigma = 2 + 4$ та иккиламчи электронларни уриб чиқаради. Улар ҳам ўз навбатида тезланиб, иккинчи динoддан σ тадан электрон уриб чиқаради ва ҳоказо. Агар биринчи динодга A фотоэлектрон келиб тушган бўлса, охирги m-диноддан анодга $A\sigma^m$ электронлар йиғилади. Фотоумножителнинг кучайтириш коэффициенти $K = \sigma^m$. У диноднинг материалига, динодлар сонига ва улар ўртасидаги кучланишга боғлиқ.

Ҳозирги замон фотоумножителларининг кучайтириш коэффицентларн 10^5—10^7 орасида бўлади.

Фотоумножителнинг чиқишида электр импульсларини R — қаршилик воситасида ўлчанади. Агар электр импульслари жуда кичик бўлса, уларни махсус кучайтиргич ёрдамида кучайтирилади. Фосфорлар юксак шаффофликка эга бўлган органик ёки анорганик моддалардан қилинади. Сцинтиллятордан қанча кўп ёруглик чиқса, катоддан шунча кўп фотоэлектронлар уриб чиқарилади.

Сцинтилляторнинг бошқа муҳим характеристикаси чақнаш вақтининг давомлилигидир. Заррз сцинтиллятордан тахминан 10^{-10} *сек* вақт ичида ўтади. Ундан кейин чақнаш бошланади. Ажрата олиш вақтининг кичик бўлиши учун чақнаш вақти 10^{-6}—10^{-9} *сек* бўлган фосфорлар танланади.

Сцинтилляцион счётчиклар ҳар хил нурланишларни қайд қилиш учун ишлатилади. Уларнинг вазифасига қараб алоҳида нурланишларга нисбатан сезгир бўлган фосфорлар ишлатилади. Масалан, фосфор ZnS(Ag) α-зарраларга нисбатан юқори сезгирликка эга бўлиб, унинг ёрдамида электронлар ва γ-квантлар билан бирга тушадиган α-зарраларни кузатиш мумкин.

NaI(Tl) — кристали γ-квантлар счётчиги учун жуда яхши фосфордир. Унинг зичлиги анча юқори бўлиб, 3,67 *г/см*^{3} га тенг.

Кристаллда иоднинг ($Z=53$) мавжуд бўлиши γ-квантларни қайд қилиши учун унинг эффективлигини 60% гача оширади. Гейгер счётчикларининг γ-квантларга нисбатан эффективлиги эса, фақатгина 1—2% ни ташкил қилади. NaI(Tl), антрацен ва ҳоказо каби фосфорларнинг чақнаш интенсивлиги ютилган энергияга пропорционалдир. Шунинг учун сцинтилляцион счётчиклар γ-квантлар, электронлар ва бошқа зарраларнинг спектрометрлари сифатида фойдаланилади. Сцинтилляцион спектрометрларнинг ажрата олиш қобилияти 7,5—10% дан ошмайди.

Ярим ўтказгичли счётчиклар. Ионизацион камеранинг ўлчамлари камайган сари унинг ҳар хил нурланишларга нисбатан эффективлиги пасаяди. Аммо ионизацион камерадаги газнн қаттиқ модда билан алмаштирсак, солиштирма ионизация тахминан 10^4 марта ортади. Бу ҳолда детекторнинг эффективлиги ўлчамлари кичик бўлган тақдирда ҳам анча юқори бўлади. Бундай детекторларни яратнш ярим ўтказгичлар технологиясини ва хусусиятини ўрганиш натижасида мумкин бўлди. Менделеев даврий системасидаги III—VII группаларнинг баъзи бир элементлари ярим ўтказгич хусусиятига эга. Барча ярим ўтказгичлар ичида детекторлар учун энг қулайи германий ва кремний монокристалларидир. Зарур электр ўтказувчанликка эга бўлган ярим ўтказгичлар олиш учун германийнинг (кремнийнинг) тоза монокристаллига III ёки V группа элементларининг кичик аралашмаси киритилади. Бу аралашмалар ярим ўтказгичларнинг электр хусусиятига қанчалик таъсир қилишини кўрайлик.

Германий монокристали кристалл панжарасининг ҳар бир тугунида биттадан тўрт валентлик атом жойлашган. Германий монокристалининг тугунларидаги атомларининг валентли богланишида саккизта электрон қатнашади: бир тугундаги атомнинг тўртта ташқи электрони ва қўшни тугундаги атомларнинг тўртта электрони бор. Кристалл панжаранинг бир тугунидаги германий атоми фосфор атоми, яъни V группа элементи билан алмаштирилган.

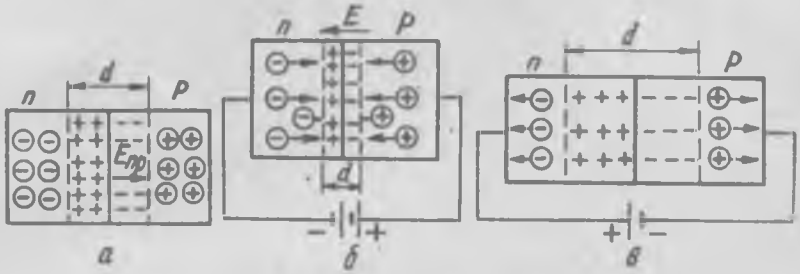
Фосфорнинг ташқи қобиғида 5 та электрон бор. 5 электрондан 4 таси чиқариб юборилган германий атомининг валентли богланишини компенсациялайди. Фосфор атомининг ядроси атрофида айланаётган 5-электрон ўз мувозанат ҳолатида тебранаётган кристалл атомлари билан тўқнашади. Бундай тўқнашишлар натижасида бешинчи электроннинг ядро билан боғланиши узилади. Фосфор билан аралашган германийда эркин электронлар ва фосфорнинг мусбат зарядланган қўзғалмас ионлари ҳосил бўлади, бунинг натижасида у электрон ўтказувчанликка эга бўлади ва n-тнп ярим ўтказгич деб айтилади. Кристаллга III группанинг 3 валентли атомлари (бор, алюминий ва бошқалар) қўшилиши билан электр ўтказувчанлик характери ўзгаради. Панжаранинг тугунига киритилган ҳар бир бор атоми чиқариб юборилган германий атомининг барча 4 валентли боғланишинн тўлдирншга ҳаракат қилади. Бор ато-

мида 4 валентли боғланишларни йиғиш учун битта валент электрончнинг етишмаслиги сабабли у қўшни германий атомидан битта валент электронини олади ва қўзғалмас манфий зарядланган ионга айланади. Панжара тугунлари орасида эркин валентли боғланишлар (мусбат зарядли) ҳосил бўлади, буларни «тешик»лар деб айтилади. Панжаранинг қўшни тугунидаги валент электрони бўш турган валентли боғланишни эгаллаши мумкин.

Бундай кўчишлар натижасида «тешик» (мусбат заряд) кристалл бўйлаб ҳаракатланади. «Тешик»нинг ҳаракати мусбат ионнинг ҳаракатига ўхшайди. Фарқи шундаки, монокристаллда мусбат заряд ҳаракатсиз атомлар занжири орқали узатилади. Германийнинг III группа атомлари билан аралашмасидан иборат монокристалларни *р*-тип ярим ўтказгичлар деб, уларнинг электр ўтказувчанлигини эса «тешик»ли ўтказувчанлик дейилади.

n-тип ярим ўтказгичдаги эркин электронлар миқдори ва *р*-тип ярим ўтказгичдаги «тешик»лар миқдори мос аралашма атомларининг миқдорига тенг. Алоҳида *n*-тип ва *р*-тип ярим ўтказгичлар электронейтралдир, чунки тешиклар ва электронларнинг зарядлари улардаги қўзғалмас ионларнинг зарядлари билан қопланади. Фараз қилайлик, ярим ўтказгич бир қисми электрон, иккинчи қисми «тешик»ли ўтказгичга эга бўлган икки қисмдан иборат бўлсин. Ярим ўтказгичнинг биринчи қисмида эркин электронлар ва иккинчи қисмида «тешик»лар бор. *n*-типдан *р*-тип ярим ўтказгичга ўтаётган электронлар юпқа чегара қатламда «тешик»ларнинг бир қисмини нейтраллайди. Шунинг учун манфий зарядланган қўзғалмас ионлар зарядининг бир қисми компенсацияланмаган ҳолда қолади ва *р*-тип ярим ўтказгичнинг юпқа қатлами манфий зарядланади. *р*-тип ярим ўтказгичдан *n*-тип ярим ўтказгичга тушаётган «тешик»лар электронларнинг бир қисмини нейтраллайди ва *n*-тип ярим ўтказгичнинг юпқа қатлами мусбат зарядланади. Шундай қилиб, *n*-тип ва *р*-тип ярим ўтказгичларнинг контакти чегарада *n*—*р* ўтиши дейиладиган юпқа қатламни вужудга келтиради. Бу қатлам электр ташувчиларга (электронлар ва «тешик»ларга) эга эмас. Шунинг учун унинг электр қаршилиги монокристаллнинг бошқа қисмига қараганда жуда юқори. *n*—*р* ўтишда *Eпр* кучланганликка эга бўлган контакт потенциаллар айирмаси вужудга келиб — бу электронларнинг *р*-тип ярим ўтказгичга, «тешик»ларни эса, *n*-тип ярим ўтказгичга ўтишларни чегаралайди. *n*—*р* ўтишли ярим ўтказгич электр токини фақат бир йўналишда ўтказади ва ярим ўтказгичли диод бўлиб хизмат қилади. Агар *n*-тип ярим ўтказгични батареянинг минусига, *р*-тип ярим ўтказгични эса мусбат қутбига уласак (32-*б* расм), *n*—*р* ўтишидаги мувозанат бузилади. Электр майдон таъсири остида электронлар *р*-тип ярим ўтказгичга, «тешик»лар эса *n*-тип ярим ўтказгичга кира бошлайди ва занжирда электр токи вужудга келади. Қутбларни ўзгартирганимизда (32-*в* расм) *n* — *р* ўтишидан барча электронлар анодга

караб, «тешик»лар эса, катодга қараб силжийди. $n-p$ ўтиш қатламининг қалинлиги ортади ва монокристалл изоляторга айланади. Ярим ўтказгичли диодларни нонловчи нурларнинг детекторлари сифатида фойдаланиш $n-p$ ўтишнинг шу хоссасига асосланганднр.



32-расм. Ярим ўтказгичда $p-n$ ўтишнинг юзага келиши.

$n-p$ ярим ўтказгичдан қилинган детектор унча катта бўлмаган пластинкадан иборат бўлиб, сиртига 2 та текис электрод суртилган. n-тип ярим ўтказгичга мусбат ишорали юқори кучланиш (бир неча 100 вольт) берилади. Кучланишнинг бундай уланишида $n-p$ ярим ўтказгич диэлектрик бўлиб қолади ва нурланиш бўлмаган пайтда электр занжирини узади. $n-p$ ўтишга нонлаштирувчи зарра тушгани ҳамон унда электрон ва «тешик»лар ҳосил бўлиб, диод қисқа муддатга ўтказгич бўлиб қолади. Занжирдаги токнинг ўтиш вақти мос электродларда электронлар ва «тешик»ларнинг йиғилиш вақти билан белгиланади. Бу ток қўшимча қаршиликда импульс ҳосил қилиб, бу импульс қайд қилиш схемасига берилади.

$n-p$ ўтишдан электронлар ва «тешик»лар йўқолган ҳамон ярим ўтказгич яна изолятор бўлиб қолади ва электр занжири узилади. Германий ва кремнийда электрон — «тешик» жуфтини ҳосил қилиш учун сарфланадиган ўртача энергия 3 *эв* га яқин бўлади. Бунинг натижасида ярим ўтказгичда газдагига нисбатан бир хил зарралар тормозланганда тахминан 10 баравар кўпроқ бошлангич зарядлар ҳосил бўлади. Шунинг учун ярим ўтказгичли детекторларнинг сезгирлиги нонизацион камераларнинг сезгирлигига қараганда анча юқори. Германий ва кремний $n-p$ ярим ўтказгичлар детектор сифатида бир қатор яхши хусусиятларга эга. Уларда нонларнинг ҳаракатчанлиги юқори ва рекомбинацияси кам. Ярим ўтказгичли детекторлар қулай ва конструкцияси оддийдир.

Ҳар хил нурларни қайд қилишда ярим ўтказгичли детектор $n-p$ ўтишнинг қалинлиги хар хил бўлади. Зарядланган оғир зарра ярим ўтказгичнинг 10 *мк* га яқин қалинликдаги қатламида тормозланади. Бундай кичик детекторлар билан алоҳида

зарраларни кузатиш эмас, ҳатто уларнинг энергетик спектрларини ҳам ўлчаш мумкин.

γ-квантларни қайд қилиш учун анча қалин ярим ўтказгичли диодлар керак. γ-квантларнинг ярим ўтказгич билан ўзаро таъсирлашувида югуриш йўли 1 *мм/Мэв* га яқин бўлган тез электронлар ҳосил бўлади. Биннобарин, γ-квантларни юқори эффективлик билан ҳисобга олиш учун $n—p$ ўтиши бир неча миллиметрдан кам бўлмаган детекторлар керак.

Ярим ўтказгичли γ-спектрометрларнинг ажрата олиш қобилияти сцинтилляцион γ-спектрометрларникига қараганда 20—30 марта яхшидир.

Ярим ўтказгичли детекторларнинг электр ўтказувчанлиги қиздирилганда ўзгаради. Шунинг учун ярим ўтказгичли детектор суюқ азот билан совутилади. Бу детекторнинг камчиликларидан биридир.

Черенков счётчиклари. Шаффоф моддада ёруғлик тезлиги $c^1 = \frac{c}{n}$ (n — синдириш кўрсатгичидир). Агар вакуумда $v > \frac{c}{n}$ тезлик билан ҳаракатланаётган зарядланган зарра шаффоф моддага тушса, унинг тезлиги шу моддадаги ёруғлик тезлиги c^1 дан катта бўлади. Синдириш кўрсатгичи қанчалик катта бўлса, шу моддадаги ёруғлик тезлиги c^1 шунчалик кичик бўлади:

сувда ($n = 1{,}33$) $c^1 = 2{,}26 \cdot 10^{10}$ *см/сек*,

шишада ($n = 1{,}50$) $c^1 = 2{,}0 \cdot 10^{10}$ *см/сек*.

Шаффоф моддаларда зарядланган зарралар $v > c^1$ тезлик билан ҳаракат қилса, модда ўзидан нур чиқаради. Бу нурланишни биринчи марта совет физиклари С. И. Вавилов ва П. А. Черенковлар очдилар. Ёруғликдан тезроқ ҳаракатланаётган зарядланган зарра ўз йўлидаги шаффоф модда молекулаларини қўзғатади. Бу молекулалар зарра траекториясига нисбатан $0 = \arccos\frac{c}{n \cdot v}$ бурчак остида тарқаладиган Вавилов-Черенков нурланишини чиқаради.

Зарра тезлиги (v) ортиши билан бурчак — 0 ортиб, $v = c$ тезликда максимал қийматга эришади. Черенков счётчикларининг ишлаш принципи Вавилов-Черенков нурланишининг хусусиятларига асосланган. Улар сцинтилляцион счётчикларга ўхшаб кетади. Черенков — счётчикларида шаффоф модда ёруғлик манбаларининг фосфорлари сифатида хизмат қилади. $v > c^1$ тезликка эга бўлган зарядланган зарралар плексигласдан қилинган ёки сув билан тўлдирилган шаффоф идишнинг цилиндрик қисмига тушади. Зарядланган зарранинг ҳаракати давомидаги қисқа муддат ичида шаффоф идиш ёруғлик манбаига айланади. Ёруғликнинг идишдан ҳаво чегарасига тушиш бурчаги тўла қайтиш бурчагига яқин бўлади. Шунинг учун ёруғлик идишдан чиқмайди. Деворлардан кўп марта қайтгандан сўнг ёруғлик фокусловчи мослама орқали фотоумножителга тушади.

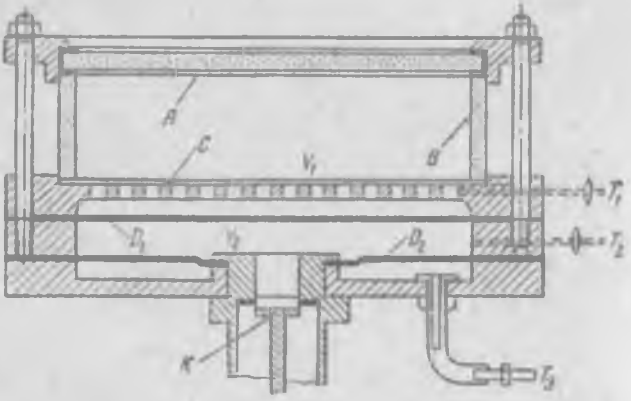
Агар идишнинг узунлиги 20 *см* га тенг бўлса, чақнаш 10^{-10} *сек* вақт давом этади. Черенков счётчиклари худди шундай жуда

кичик ажрата олиш вақтига эга. Бу счётчиклар фақат зарядланган зарраларни уларнинг тезликлари шаффоф моддадаги ёруғлик тезлигидан юқори бўлган ҳолдагина қайд қилади. Шунинг учун уларни остонавий детектор дейилади.

Из асбоблар. Из асбоблар қаторига қуйидагиларни киритиш мумкин: Вильсон камераси, диффузион камера, пуфакли камера ва фотоэмульсион пластинкалар. Уларнинг ишлаш принципи ионларнинг ўта тўйинган бугда конденсация маркази бўлиш хоссасига асосланган. Зарядланган зарра бундай муҳитда ҳаракатланганда унинг йўлида суюқликнинг жуда майда томчиларидан иборат из қолади. Ўта қиздирилган суюқликда эса буғ пуфакчаларининг занжиридан иборат из қолади. Кучли ёритилганлик таъсирида ҳосил бўлган суюқлик томчилари ёки буғ пуфакчалари қора фондаги ёруғ нуқталарга ўхшайди, излар эса, ёруғ чизиқларга ўхшайди. Бундай асбобларда ҳаракатланаётган зарраларнинг изларини кўриш ёки суратга олиш мумкин. Из асбоблар алоҳида ядро процесслари ҳақида маълумотлар беради. Магнит майдони билан бирга ишлатилганда эса, бу асбоблар зарранинг импульси ва энергиясини аниқлашда қулайлик туғдиради.

Вильсон камераси. Зарядланган зарраларнинг изларини ва ядро ўзгаришларини кузатишга имкон берган асбоб 1912 йилда инглиз физиги Ч. Вильсон томонидан яратилган Вильсон камерасидир.

Вильсон камерасининг ишлаш принципи ионларнинг ўта тўйинган буғ томчиларининг конденсацияланиш маркази бўла олиш хусусиятига асосланган. Агар буғ чангдан ва конденсацияни вужудга келтирадиган бошқа объектлардан холи бўлса, конденсация бошланмайди. Вильсон камераси бирор конденсацияланмайдиган газ (ҳаво, водород, гелий, аргон, азот) ёки суюқликнинг тўйинган буғлари билан, кўпинча суюқликлар (сув



33- расм. Вильсон камерасининг схематик кўриниши.

ва спирт аралашмасининг буглари) билан тўлдирилган герметик ёпиқ V_1 (ишчи ҳажми) ҳажмдан иборат (33-расм). Камеранинг деворлари шишадан ёки металлдан қилинган, камеранинг ўзи эса, цилиндр ёки параллелепипед шаклига эга бўлиб, чизиқли ўлчамлари 10 *см* дан 1 *м* гача ва ундан ҳам катта бўлиши мумкин. Ҳозирги замон камераларида ишчи ҳажм юзларча ва мингларча литр бўлиши мумкин. Ишчи ҳажмда ўта тўйинган буғ ҳосил қилиш учун деворларнинг бирор қисми қўзғаладиган қилинади.

Газ ҳажмини адиабатик равишда V_2 ҳажмгача кенгайтириб, температурани қуйидаги муносабатни қаноатлантирадиган қийматгача пасайтирамиз:

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

Бу ерда $\gamma=\frac{C_v}{C_p}$ асосий газ иссиқлик сиғимларининг нисбатидир. Температуранинг янги T_2 қийматида буғ ўта тўйинган бўлади ва сезгирлик вақти деб айтиладиган вақт давомида шу ҳолатда туради. Агар шу вақтда камеранинг ишчи ҳажми орқали қандайдир тез зарра учиб ўтса, у газнинг ўз йўлидаги атомларини ионлаштиради. Зарра траекторияси бўйлаб вужудга келган ионлар ўта тўйинган буғ конденсацияланишининг марказларига айланади, натижада траектория бўйлаб из ҳосил бўлади. Камеранинг мукаммаллашган конструкцияларида буғнинг ўта тўйинган ҳолатига ёрдамчи ҳажмдан K клапан орқали сиқилган ҳавони тез чиқариб юбориш орқали эришилади. Ёрдамчи ҳажмда босимнинг камайиши натижасида D_1-диафрагма тез тушади ва камеранинг ишчи ҳажмида газ адиабатик 25—30% га кенгайиб, температура пасаяди ва буғ ўта тўйинган ҳолга ўтади.

Қисқаси ишчи ҳажмдаги газ ва буғнинг кенгайишини мослаштириш мумкин. Махсус найча сиқилган ҳавони ёрдамчи V_2 ҳажмга чиқариб юбориш учун хизмат қилади, бу эса ҳар бир иш циклининг охирида диафрагмани олдинги ҳолатига келтиради. Тўр D_2-резина диафрагманинг юқорига қиладиган ҳаракатини чегаралайди. Камеранинг ишчи ҳажми B-шиша ён деворлари билан, юқори қисми — A текис ойна ва пастки қисми қора материал билан қопланган (қоронғи фон бўлиши учун шундай қилинади), C металл тўр билан чегараланган. Ишчи ҳажмни ёритиш учун ён томондан импульсли ёритувчи лампа қўйилади.

Камерадаги эски ионларни йўқотиш мақсадида кўпинча сантиметрига бир неча 10 $\frac{в}{см}$ кучланганликка эга бўлган тозаловчи электр майдон қўйилади.

Космик нурларни текширишда счётчиклар билан бошқариладиган Вильсон камералари ишлатилади. Камерадан олдин ва ундан кейин мослашишлар схемаси бўйича уланган счётчиклар

жойлаштириб қўйилади. Счётчиклар орқали зарралар ўтганда улар ишлайди ва камерани ишга солиб ўтган заррани қайд қилади.

Зарранинг электр заряди ишорасини, импульсини ва энергиясини аниқлаш учун Вильсон камераси камера ўқига параллел бўлган магнит майдонига жойлаштирилади. Бу биринчи марта Совет физиклари П. Л. Капица ва Д. В. Скобельцин томонидан 1927 йилда α-зарраларни ва космик нурларни ўрганишда қўлланилган эди.

Зарранинг учиш йўналиши аниқ бўлса, траекториясининг магнит майдонида эгриланишига қараб зарра зарядининг ишорасини аниқлаш мумкин.

Вильсон камераси қулайлиги ва юксак эффективлиги билан бир қаторда камчиликларга ҳам эга:

1. Зарядланган зарралар изларини кузатиш вақти, яъни камеранинг сезгирлик вақти анча кам бўлиб, 0,1—1 *сек* га тенг.

2. Камеранинг ишчи ҳажмидаги модда кам бўлгани учун унинг тормозлаш қобилияти кичик.

3. Бир суратда қайд қилинган ҳодисалар фотография процессининг давомийлиги қадар аниқлик билан оний деб ҳисобланиши мумкин, бу эса ядро процесслари учун жуда катта вақтдир.

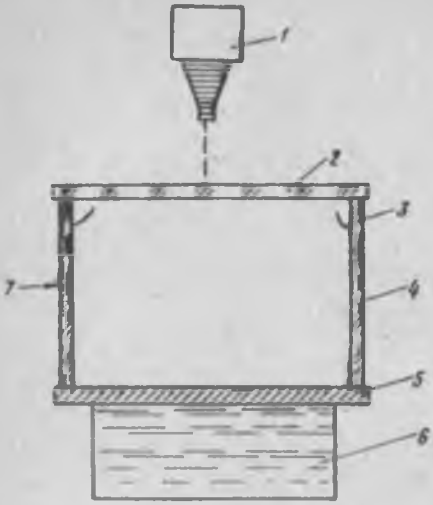
4. Вильсон камерасининг ўлчамлари катта бўлгани туфайли излар чаплашганроқ бўлади.

Диффузион камера. Бу асбоб 1936 йилда биринчи марта А. Лангсдорф томонидан ионлаштирувчи зарраларнинг изларини кузатиш учун таклиф қилинган.

Диффузион камера конструкцияси ўзгартирилган Вильсон камерасидан иборат бўлиб, доим иш ҳолатида бўлади. Зарядланган зарра камеранинг ишчи ҳажмига қачон келиб тушмасин, у доим кўринадиган из қолдиради. Бунинг ишлаш принципи ҳам Вильсон камерасининг ишлаш принципининг ўзидир. Вильсон камерасида бугнинг ўта тўйинган ҳолатга адиабатик кенгайиш йўли билан қисқа муддатда эришиладн. Бу вақт давомнда камера сезгир бўлиб, ўтаётган заррани қайд қила олади.

Аммо сезгирлик вақтининг 2 та кетма-кет кенгайиш орасидаги вақтга нисбати жуда кам бўлиб, 10^{-3}—10^{-2} га тенг. Вильсон камерасининг бу камчилиги ишчи ҳажмининг кенгайиш ва сиқилиш системаси бўлмайдиган диффузион камерада тузатилган. Диффузион камерада буғнинг ўта тўйиниши камеранинг туби ва қопқоғи ўртасида доим мавжуд бўлган температуралар фарқи туфайли амалга оширилади.

Камеранинг қопқоғи билан туби ўртасида ўта тўйинган буғ қатлами бор, бу қатлам ионларида томчилар ҳосил бўлиш процесси юз беради. Температура градиентини (тахминан 5—10 *градус/см*) танлаб бу қатлам баландлигини 50—70 *мм* га ва ундан ҳам ортиққа етказиш мумкин.



34-расм. Диффузион камера:

1 — фотоаппарат, *2* — шиша қопқоқ, *3*—нов, *4* — шиша цилиндр, *5* — металл пластинка, *6* — туз, *7* — ёритгич.

34-расмда диффузион камера конструкцияларидан бирининг схемаси тасвирланган. Камера цилиндрик шаклдаги герметик ёпиқ идишдан иборат. Бу идиш Вильсон камерасида ишлатиладиган ҳар қандай газ билан тўлдирилиши мумкин. Цилиндрнинг ён девори шишадан қилинади.

Юқоридаги девор билан кичкина металл нов бирлаштирилган. Нов буғ манбаи бўлиб, метил ёки этил спирти билан тўлдирилади. Новдан юқорироқда цилиндрик сиртни ёпиш учун усти текис ойна бор. Нов турган металл ғилдиракнинг ва спиртнинг температураси 20—40°С атрофида сақланади. Камеранинг пастки металл туби қаттиқ углекислота ёрдамида —30—50°С температурагача совитилади. Буғ идишнинг юқори қисмидан пастки қисмига диффузияланади.

Диффузион камера узлуксиз ишлайди, аммо ишчи ҳажмни суратга олиш маълум интерваллларда амалга оширилади, чунки бундан олдин суратга олинган изнинг томчилари камера тубига тушиб улгуриши учун вақт (3—5 *сек*) керак. Камеранинг сезгир қатламида ишчи ҳажмини ионлардан тозалаш учун ингичка симдан қилинган тўр бўлиб, бунга тозаловчи потенциал берилади.

Пуфакли камера. 1952 йилда Д. Глезер томонидан (АҚШ) яратилган ва пуфакли камера деб ном олган асбоб махсус танланган ўта қиздирилган шаффоф суюқлик билан тўлдирилган идишдан иборатдир. Камера орқали ўтаётган зарядланган зарра ўз изи давомида ўта қиздирилган суюқликнинг шиддат билан қайнашига сабаб бўлади ва зарранинг йўли буғ пуфакчаларидан иборат бўлиб қолади. Камерадаги суюқлик юқори босим остида бўлгани учун суюқликнинг қайнаб кетишига халақит беради. Ҳар хил суюқликлар учун бу босим ҳар хил қийматга эгадир (3—22 *атм*). Босим тўсатдан нормал босимгача пасайганда суюқлик ўта қиздирилган бўлади ва зарра ҳосил қилган ионлар атрофида суюқлик шиддат билан қайнай бошлайди. Ундан кейинги зарраларни қайд қилиш учун камера навбатдаги циклга тайёр бўлиши керак. Пуфакли камерада иш цикли 4—10 *сек* давом этади. Сезгирлик вақти циклининг умумий вақтига нисбати диффузион камерадагига қараганда кичик бўлиб,

Вильсон камерасидагига қараганда эса каттароқдир. Модда юқори зичликка эга бўлганлиги сабабли кўпгина ҳолларда зарранинг бутун изини тўла кўриш мумкин. 1960 йилда пуфакли камерани яратганлиги учун Д. Глезерга физика бўйича Нобель мукофоти берилди. Бирлашган Ядро тадқиқот институтида 20 метрга мўлжалланган водород пуфакли камера ва ишчи ҳажми 250 литр бўлган камера қурилган.

Фотоэмульсия усули. Сўнгги йилларда ядро физикасини ўрганишда счётчиклар ва камераларга қараганда баъзи бир қулайликларга эга бўлган фотоэмульсия усулидан ҳам фойдаланилмоқда. Бу усулнинг мазмуни шундан иборат. Махсус тайёрланган фотоэмульсия зарядланган зарранинг изини қайд қилади. Бу усул зарра ҳаракатининг йўналишини, энергиясини, ҳосил бўлган жойини, табиатини ва ҳоказоларни аниқлашга имкон беради.

Бу асбобда ишлатиладиган сезгир пластинка ролини плёнка ёки қоғозга суртилган бромли кумуш (AgBr) монокристалларининг желатинадаги эритмаси қатлами бажаради.

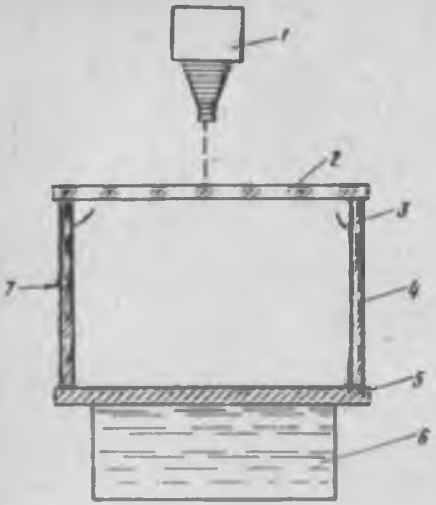
1910 йилдаёқ бромли кумуш доначалари орқали ионлаштирувчи зарра ўтганда, уларни очилтириш мумкинлиги аниқланган эди. Зарядланган зарра фотоэмульсия орқали ўтганда, унинг траекторияси бўйлаб бром ионларига тегишли электронлар осонгина ажратиб чиқарилади. Бу электронлар кумуш ионларига қўшилиб, кумуш атомларини ҳосил қилади. Фотопластинкани очилтириш билан яширин тасвирни кўзга кўринадиган қилишимиз мумкин. Ёруғ фонда учиб ўтган зарранинг қора изи намоён бўлади. Зарранинг ионлаштирувчи таъсири қанчалик юқори бўлса, яъни унинг ионизацияга сарфлайдиган энергияси қанчалик кўп бўлса, унинг йўлида қора доначалар шунчалик кўп ва изи шунчалик қалин бўлади. Зарра изининг кўриниши (қалинлиги, эгрилиги) га қараб зарранинг табиати ва энергияси ҳақида фикр юритиш мумкин.

Оптик нурларда расм олишга мўлжалланган оддий фотопластинкалар ионлаштирувчи зарраларни қайд қилиш учун яроқсиздир. Ядро зарраларини қайд қилиш учун махсус фотопластинкалар (ядро фотоэмульсиялари) яратилган ва ишлатилади, улар оддий оптик фотопластинкалардан қуйидагилар билан фарқ қилади.

1. Ядро фотоэмульсияларининг сезгирлиги оптик фотоэмульсияларникига қараганда жуда юқори бўлади. Бу бромли кумуш монокристалидаги доначалар сонини ошириш ва ўлчамларини кичрайтириш йўли билан амалга оширилади.

2. Ядро фотоэмульсиялари анча катта қалинликка эга. Ҳозирги пайтда қалинлиги 600, 1000 ва 1200 *мк* бўлган эмульсиялар бор.

Қалинлиги 100 *мк* гача бўлган фотоэмульсияларни очилтириш қийин эмас. Бутун қалинлиги бўйича бир текис очилтирилиши лозим бўлган қалин (1200 *мк* гача) фотоэмульсион қат-



34-расм. Диффузион камера:

1 — фотоаппарат, *2* — шиша қопқоқ, *3*—нов, *4* — шиша цилиндр, *5* — металл пластинка, *6* — туз, *7* — ёритгич.

34-расмда диффузион камера конструкцияларидан бирининг схемаси тасвирланган. Камера цилиндрик шаклдаги герметик ёпиқ идишдан иборат. Бу идиш Вильсон камерасида ишлатиладиган ҳар қандай газ билан тўлдирилиши мумкин. Цилиндрнинг ён девори шишадан қилинади.

Юқоридаги девор билан кичкина металл нов бирлаштирилган. Нов буғ манбаи бўлиб, метил ёки этил спирти билан тўлдирилади. Новдан юқорироқда цилиндрик сиртни ёпиш учун усти текис оппа бор. Нов турган металл ғилдиракнинг ва спиртнинг температураси 20—40°С атрофида сақланади. Камеранинг пастки металл туби қаттиқ углекислота ёрдамида —30—50°С температурагача совитилади. Буғ идишнинг юқори қисмидан пастки қисмига диффузияланади.

Диффузион камера узлуксиз ишлайди, аммо ишчи ҳажмни суратга олиш маълум интерваллларда амалга оширилади, чунки бундан олдин суратга олинган изнинг томчилари камера тубига тушиб улгуриши учун вақт (3—5 *сек*) керак. Камеранинг сезгир қатламида ишчи ҳажмини ионлардан тозалаш учун ингичка симдан қилинган тўр бўлиб, бунга тозаловчи потенциал берилади.

Пуфакли камера. 1952 йилда Д. Глезер томонидан (АҚШ) яратилган ва пуфакли камера деб ном олган асбоб махсус танланган ўта қиздирилган шаффоф суюқлик билан тўлдирилган идишдан иборатдир. Камера орқали ўтаётган зарядланган зарра ўз изи давомида ўта қиздирилган суюқликнинг шиддат билан қайнашига сабаб бўлади ва зарранинг йўли буғ пуфакчаларидан иборат бўлиб қолади. Камерадаги суюқлик юқори босим остида бўлгани учун суюқликнинг қайнаб кетишига халақит беради. Ҳар хил суюқликлар учун бу босим ҳар хил қийматга эгадир (3—22 *атм*). Босим тўсатдан нормал босимгача пасайганда суюқлик ўта қиздирилган бўлади ва зарра ҳосил қилган ионлар атрофида суюқлик шиддат билан қайнай бошлайди. Ундан кейинги зарраларни қайд қилиш учун камера навбатдаги циклга тайёр бўлиши керак. Пуфакли камерада иш цикли 4—10 *сек* давом этади. Сезгирлик вақти цикланинг умумий вақтига нисбати диффузион камерадагига қараганда кичик бўлиб,

Вильсон камерасидагига қараганда эса каттароқдир. Модда юқори зичликка эга бўлганлиги сабабли кўпгина ҳолларда зарранинг бутун изини тўла кўриш мумкин. 1960 йилда пуфакли камерани яратганлиги учун Д. Глезерга физика бўйича Нобель мукофоти берилди. Бирлашган Ядро тадқиқот институтида 20 метрга мўлжалланган водород пуфакли камера ва ишчи ҳажми 250 литр бўлган камера қурилган.

Фотоэмульсия усули. Сўнгги йилларда ядро физикасини ўрганишда счётчиклар ва камераларга қараганда баъзи бир қулайликларга эга бўлган фотоэмульсия усулидан ҳам фойдаланилмоқда. Бу усулнинг мазмуни шундан иборат. Махсус тайёрланган фотоэмульсия зарядланган зарранинг изини қайд қилади. Бу усул зарра ҳаракатининг йўналишини, энергиясини, ҳосил бўлган жойини, табиатини ва ҳоказоларни аниқлашга имкон беради.

Бу асбобда ишлатиладиган сезгир пластинка ролини плёнка ёки қоғозга суртилган бромли кумуш (AgBr) монокристалларининг желатинадаги эритмаси қатлами бажаради.

1910 йилдаёқ бромли кумуш доначалари орқали ионлаштирувчи зарра ўтганда, уларни очилтириш мумкинлиги аниқланган эди. Зарядланган зарра фотоэмульсия орқали ўтганда, унинг траекторияси бўйлаб бром ионларига тегишли электронлар осонгина ажратиб чиқарилади. Бу электронлар кумуш ионларига қўшилиб, кумуш атомларини ҳосил қилади. Фотопластинкани очилтириш билан яшрин тасвирни кўзга кўринадиган қилишимиз мумкин. Ёруғ фонда учиб ўтган зарранинг қора изи намоён бўлади. Зарранинг ионлаштирувчи таъсири қанчалик юқори бўлса, яъни унинг ионизацияга сарфлайдиган энергияси қанчалик кўп бўлса, унинг йўлида қора доначалар шунчалик кўп ва изи шунчалик қалин бўлади. Зарра изининг кўриниши (қалинлиги, эгрилиги) га қараб зарранинг табиати ва энергияси ҳақида фикр юритиш мумкин.

Оптик нурларда расм олишга мўлжалланган оддий фотопластинкалар ионлаштирувчи зарраларни қайд қилиш учун яроқсиздир. Ядро зарраларини қайд қилиш учун махсус фотопластинкалар (ядро фотоэмульснялари) яратилган ва ишлатилади, улар оддий оптик фотопластинкалардан қуйидагилар билан фарқ қилади.

1. Ядро фотоэмульсияларининг сезгирлиги оптик фотоэмульсияларникига қараганда жуда юқори бўлади. Бу бромли кумуш монокристалидаги доначалар сонини ошириш ва ўлчамларини кичрайтириш йўли билан амалга оширилади.

2. Ядро фотоэмульснялари анча катта қалинликка эга. Ҳозирги пайтда қалинлиги 600, 1000 ва 1200 *мк* бўлган эмульсиялар бор.

Қалинлиги 100 *мк* гача бўлган фотоэмульсияларни очилтириш қийин эмас. Бутун қалинлиги бўйича бир текис очилтирилиши лозим бўлган қалин (1200 *мк* гача) фотоэмульсион қат-

ламларни очилтириш анча қийин. Бу қийинчиликларни йўқотиш мақсадида махсус усуллардан фойдаланилади. Сўнгги йилларда шиша асосга эга бўлмаган фотоэмульсиялар ишлатила бошланди. Фотопластинкалардан олинган эмульсион қатламлар бир-бирининг устига ёки текширилиши лозим бўлган материалдан қилинган пластинкага ёпиштирилади. Керакли қалинликдаги қатламларни ёруғлик ўтказмайдиган камераларга жойлаштирилиб, зарралар билан нурлатилади ва очилтирилади. Бундай қатламли эмульсион камералар ҳар хил зарралар атворини бир неча *см* чуқурликкача кузатиш имконини беради. 1 *см* қалинликдаги фотоэмульсия эффектив қалинлиги бўйича ҳавонинг 20 метрига эквивалент бўлганлиги учун бу жуда катта масофадир. Демак, Вильсон камераси ишчи ҳажмидаги бир *атм.* босимда $8 \cdot 10^6$ $м^3$ ҳавонинг эффективлигига фотоэмульсион камера ҳажмининг 1 метри тўғри келади.

53-§. ЗАРРАЛАР ЭНЕРГИЯСИНИ, ЗАРЯДИНИ ВА МАССАСИНИ АНИҚЛАШ

Магнит спектрометрлар. Зарядланган зарраларнинг хусусиятларини ўрганиш учун баъзан магнит майдонидан фойдаланадилар. Кучланганлиги H бўлган магнит майдонида тезлиги v бўлган e зарядли заррага

$$F = evH \sin \alpha$$

Лоренц кучи таъсир қилади. Бу куч зарра ҳаракати йўналишига ва магнит майдон кучланганлигига перпендикулярдир (α—ҳаракат йўналиши билан кучланганлик орасидаги бурчак).

Хусусий ҳолда бир жинсли ($H = \text{const}$) магнит майдони куч чизиқларига перпендикуляр равишда ($\sin \alpha = 1$) учиб кираётган заррага қиймати бўйича ўзгармас ва ҳамма вақт ҳаракат йўналишига перпендикуляр бўлган $f = evH$ куч таъсир қилади. Бундай куч таъсири остидаги ҳаракат айлана бўйлаб текис ҳаракат бўлиб, f кучнинг ўзи эса, марказга интилма куч бўлади. Марказга интилма тезланиш $a = \frac{v^2}{R}$ эканлигини ҳисобга олиб, Ньютоннинг иккинчи қонуни ёрдамида зарранинг v тезлиги билан зарра ҳаракат қилаётган айлана радиуси ўртасидаги боғланишни топа оламиз:

$$v = \frac{eRH}{m}.$$

Маълум магнит майдонига жойлаштирилган пуфакли камерада ёки Вильсон камерасида ҳаракатланаётган зарра изининг эгрилик радиусини ўлчаб юқоридаги ифода ёрдамида v, m ва e катталиклардан бирини аниқлаш мумкин. Келтирилган формулалардан кўриниб турибдики, зарранинг майдонда оғиши унинг учта характеристикасига — зарядига, массасига ва тезлигига боғлиқ экан. Демак, бу катталиклардан бирортасини аниқлаш учун қолган иккитасини билишимиз керак. Лекин ҳар гал зар-

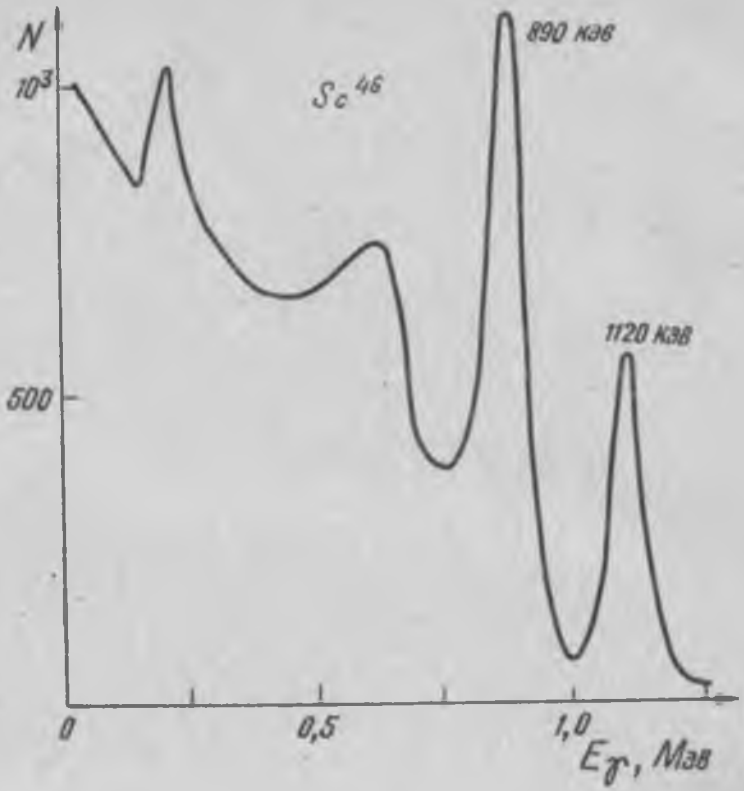
раниинг ҳамма параметрларини аниқлашнинг кераги йўқ. Кўпинча биз қандай зарралар билан ишлашимизни олдиндан биламиз. Масалан, радиоактив парчаланишни ўрганаётганимизда фақат α-зарралар, электронлар ёки позитронларни ишлатишимиз мумкин. Электрон ва позитроннинг зарядлари қарама-қарши бўлганлиги учун ҳар қандай майдонда ҳам улар қарама-қарши томонга огади. Позитрон билан α-зарра бир томонга оғса ҳам, массалари бир-биридан жуда катта фарқ қилганлиги учун буларни бир-биридан ажратиш қийин эмас. Зарраларни электр ёки магнит майдонида оғдириш усули α- ва β-зарралар энергияларини ўлчашда кенг қўлланилади. Шундай мақсадда ишлатиладиган асбоблар ***альфа*** ёки ***бета-спектрометрлар*** деб аталади. Одатда альфа-спектрометрларида ҳам, бета-спектрометрларида ҳам магнит майдонидан фойдаланилади, чунки электр майдонига нисбатан бу қулайроқдир.

Кучли электр майдони ҳосил қилиш учун юқори кучланишга мўлжалланган изоляторлар зарур. Кучли магнит майдонини эса, паст кучланишли ток манбаи билан ҳам ҳосил қилиш мумкин.

Спектрометр — магнит майдонига вакуум камераси жойлаштирилган катта магнитдан иборат. Камеранинг бир томонида текширилувчи нурланишнинг манбаи, иккинчи томонида зарядланган зарралар детектори жойлаштирилган. Ичига ҳар хил бегона зарралар кирмаслиги ва счётчикни манбанинг нурланишидан ҳимоя қилиш мақсадида спектрометр камерасининг ҳамма томони қўрғошин билан беркитилади. Махсус диафрагмалар ёрдамида манбадан чиқаётган зарраларнинг ингичка дастаси ажратилади. Шунинг учун зарра счётчикка тушганлигидан унинг шу асбоб конструкциясидан маълум бўлган R радиусли айлана ёйи бўйлаб ҳаракатқилганлигини биламиз. Магнит майдон қийматини билган ҳолда бизга таниш $p=eRH\frac{1}{c}$ формула орқали зарра импульсини ва, демак, энергиясини ҳам аниқлай оламиз.

Магнит майдонининг маълум бир қийматида счётчикка фақат бир хил энергияли зарралар келиб тушади. Майдон қийматини кетма-кет ўзгартириб ва унинг ҳар бир қийматида счётчикнинг вақт бирлиги ичидаги ҳисоблашлар сонини аниқлаб, берилган радиоактив моддадан қандай энергияли зарралар чиқаётганлигини ва ҳар бир энергияга тегишли бўлган зарраларнинг нисбий миқдорини аниқлаш мумкин. Шундай ўлчаш натижаларини 35- расмда тасвирланган графиклар шаклида кўрсатиш қулайдир. Бу ерда абцисса ўқи бўйича зарраларнинг энергияси, ордината ўқи бўйича эса счётчикнинг ҳар бир энергиядаги ҳисоблашлари қўйилган. Бундай графикларни одатда зарраларнинг энергетик спектрлари дейилади. Асбобнинг номи — спектрометр ҳам шундан келиб чиққан.

Ҳозирги замон альфа- ва бета-спектрометрлари бир-бирларидан фақат конструктив хусусиятлари, ўлчамлари (одатда 1 *м* га яқин) ва магнит майдонининг катталиги билан фарқ қилади. Улар зар-



35- расм. Гамма-нурланиш спектри (радиоактив манба Sc^{46}).

раларнинг энергиясини жуда юқори аниқликда ўлчаш имконинг беради, йўл қўйиладиган хатолар ўлчанадиган катталикнинг 1/1000 қисмидан ошмайди.

Биз фикр юритаётган ҳодисаларда зарралар ёруғлик тезлигига яқин бўлган жуда катта тезликда ҳаракат қилади. Бундай зарраларнинг энергияси импульс билан оддийгина $E = \frac{p^2}{2m}$ формула орқали эмас, нисбийлик назариясидан келиб чиқадиган $E = p \cdot c$ формула билан боғланади. Бунга зарра импульсининг магнит майдони катталиги ва траектория радиуси орқали ифодасини қўйсак, энергия учун: $E = eHR$ ифодани оламиз.

Шундай қилиб, жуда тез ҳаракатланаётган зарраннг магнит майдонидаги траектория радиуси унинг энергиясига боғлиқ бўлиб, массасига боғлиқ эмас. Агар энергияни электрон-вольтларда ҳисоблаб, заряд катталигини $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ *CGSE* заряд бирлигига тенг деб қабул қилсак, охирги ифода $E = 300\,HR$ кўринишга келади.

Совет физиклари А. И. Алиханов ва А. И. Алиханян космик нурларни ўрганиш учун махсус типдаги оригинал қурилма яратдилар. Бу қурилманинг асосий қисми катта электромагнит бўлиб, унинг қутблари орасидаги оралик текислиги ер текислигига перпендикуляр жойлаштирилган. Магнитнинг устида ва остида бир-бирига яқин бир неча қатор счётчиклар жойлаштирилган. Магнитнинг бошқа томонида махсус шчитга кичкина лампочкалар ўрнатилган. Бу лампочкаларнинг ўрнатилиши қурилмадаги счётчикларнинг ўрнатилишига мос келади.

Қайси счётчикда электр импульси ҳосил бўлса, унга мос келадиган лампочка ёниб ўчади. Лампочкали шчит автоматик равишда ишлайдиган фотоаппарат билан суратга олинади. Мослашишлар схемаси орқали шундай қилинганки, фотоаппарат ҳар бир қаторда биттадан лампочка ёнгандагина ишлайди. Олинган суратлар зарранинг магнит майдонидаги ҳаракат траекториясининг R радиусини ва энергиясини ҳисоблашга имкон беради.

Зарраларни магнит майдонида оғдириш усулини бошқа усуллар билан бирга қўшиб кўп зарядли зарраларнинг (гелийдан оғирроқ элементлар ядроларининг) энергиясини аниқлаш мумкин. Аммо бу усуллар анча мураккаб бўлганлиги учун биз улар тўғрисида тўхталиб ўтирмаймиз. Шуни таъкидлаш керакки, барча тажрибаларда зарранинг оғиш бурчаги ёки траекториясининг радиуси ўлчаниб, энергияси эса ифодага e заряд кирадиган формулалар орқали топилади. Шундай қилиб, Милликэн тажрибаларида аниқланган электрон заряди маълум бўлгани учун зарраларнинг энергияларини аниқлаш мумкин бўлди.

Магнит спектрометрлари жуда аниқ, лекин шу билан бирга жуда мураккаб ва нозик асбоблардир. Лекин зарядланган зарралар энергиясини бошқа йўллар билан ҳам ўлчаш мумкин. Масалан, ионизацион камераларда, пропорционал, сцинтилляцион ёки кристаллик счётчикларда топиладиган импульсларнинг амплитудаси орқали ўлчаш мумкин.

Электр импульси амплитудасини ўлчаш жуда осондир. Шу мақсадлар учун яратилган асбоблар — дискриминаторлар, бир каналлик ва кўп каналлик амплитуда анализаторлари фақатгина импульслар амплитудасини аниқлаб қолмай, балки у ёки бу амплитудага эга бўлган импульслар сони (импульслар спектори)ни ҳам аниқлайди. Аммо зарралар қандай энергияга эга эканлигини бунга қараб билиш мумкин эмас. Гап шундаки, импульснинг амплитудаси зарра энергиясига пропорционал бўлса ҳам пропорционаллик коэффициентининг ўзи ўлчаниши қийин бўлган кўпгина катталикларга боғлиқ: камеранинг ва унга келадиган электр симларининг электр сиғими, кучайтиргичнинг кучайтириш коэффициенти ва ҳоказолар.

Албатта ҳар сафар бу катталикларни қайтадан ўлчаш мумкин, лекин жуда кўп меҳнат талаб қиладиган ишдир. Одатда бошқачароқ иш кўрилади. Тайёрланган камерага энергияси (E_0) олдиндан маълум бўлган радиоактив препарат киритилиб,

импульсларнинг a_0 — амплитудаси ўлчанади. Ундан кейин ўша камерага энергияси (E) номаълум бўлган зарра киритилиб, импульснинг a — амплитудаси яна ўлчанади. E_0 ва E катталиклар a_0 ва a қийматларга пропорционал бўлгани учун текширилаётган зарралар энергиясини қуйидаги пропорция билан топиш мумкин:

$$\frac{E_0}{a_0} = \frac{E}{a}.$$

Бундай ўлчашларни нисбий ўлчашлар деб айтилади, чунки энергияси олдиндан маълум бўлган зарра эталон вазифасини бажаради. Бир қатор қўшимча шароитлар таъсирида камера ва счётчиклардан олинаётган импульсларнинг амплитудалари доимо фарқ қилади. Бу ҳолат ушбу усулнинг қўлланилишини бир оз чегаралайди. Усулнинг хатоси 0,5—1% атрофида бўлиб, электромагнит оғдириш усулндагига қараганда бир оз каттароқдир. Лекин бутун тажриба жуда осонлашади. Шунинг учун бу усул жуда кенг тарқалган.

Гамма-нурлар энергиясини ўлчаш. Юқорида айтиб ўтганимиз каби γ-квантларнинг ўзлари атомларни қўзғата олиш ва ионлаштириш имконига эга эмас, аммо бирор модда билан ўзаро таъсирлашганда баъзи бир эффектлар натижасида тез электронлар ҳосил бўлиб улар кучли ионизацияни вужудга келтиради. Хусусан фотоэффектда фотоннинг энергияси E_γ электронга берилади. Натижада электрон энергияси E_e билан қуйидагича боғланади:

$$E_e = E_\gamma - I,$$

бу ерда I — электронни атомдан уриб чиқариш учун сарф қилинган ионизация энергияси. I катталик кўпинча аниқ бўлади; у ν-нурларнинг энергиясидан анча кичик. Шунинг учун фотоэффектда уриб чиқарилган электрон энергияси тахминан фотон энергиясига тенг бўлади.

Бундай усул билан ν-нурлар энергиясини ўлчаш учун сцинтилляцион счётчиклардан фойдаланиш қулайроқдир. Бу счётчикнинг кристалида фотоэффект билан бир қаторда уриб чиқарилган электроннинг чақнаб тормозланиш процесси ҳам бўлади. Счётчикнинг фотоумножителидан олинаётган импульснинг амплитудаси қайд қилинган фотон энергиясига пропорционал бўлади. Бошқа иккита эффект — комптон сочилиши ва жуфтлар ҳосил бўлиши — кузатилаётган спектрни мураккаблаштирувчи бегона импульсларни вужудга келтиради. Аммо бу импульсларнинг амплитудаси фотоэффект амплитудасидан жуда кичик бўлгани учун улардан қутулиш осон. Фотонлар энергиясини бошқа усулда ҳам ўлчаш мумкин.

Натижа қилиб айтганда, γ-нурларнинг энергиясини ўлчаш зарядланган зарралар энергияларини ўлчашга қараганда қийинроқдир.

Нейтронлар энергиясини ўлчаш. Амалда атомларнинг электрон қобиқлари билан ўзаро таъсирлашмаганлиги сабабли нейтронлар энергиясини ўлчаш анча қийин. Нейтронни текширишнинг ягона йўли унинг ядролар билан ўзаро таъсирини кузатишга асосланган дир. Лекин нейтроннинг атом ҳажмининг 1/1 000 000 000 000 қисмини эгаллаб турган ядро билан тўқнашиш эҳтимоллиги ниҳоятда кичикдир. Нейтрон энергиясини аниқлаш мақсадида турткн ядроларни қайд қилиш қулайроқдир. Сочувчи модда сифатида водород ёки водородли моддалар ишлатилади. Оддий водороднинг ядроси — протон нейтрон массасига деярли тенг массага эга. Шунинг учун тез нейтроннинг тинч турган протон билан тўғри тўқнашувида нейтроннинг бутун энергияси протонга берилиши мумкин. Тўқнашув тўғри бўлмаганда протонга нейтрон энергиясининг фақат бир қисми берилади, энергиянинг узатилиш даражаси тўқнашиш аниқлигига боғлиқ. Шундай қилиб, агар тўқнашиш тўғри бўлса, нейтрон энергиясини аниқлаш жуда осон: у тўғридан-тўғри туртки токининг энергиясига тенг бўлади. Аммо тўқнашувни қандай қилиб билиш керак? Агар нейтронларнинг йўналиши аниқ бўлса, зарядланган зарралар изларини кўрсатадиган детекторлардан фойдаланиб, керакли йўналишдаги протонлар изларини танлаб олиш ва уларнинг узунлигига қараб энергияни аниқлаш мумкин. Агар нейтронлар ҳар хил йўналншларда учаётган бўлса-чи? Биринчи қарашда туртки протонлар усулини бундай шароитларда бутунлай қўлланиб бўлмайдиганга ўхшайди. Аммо чуқурроқ анализ қилиш шуни кўрсатадики, нейтроннинг протон билан тўқнашганида протонга нолдан бошлаб нейтроннинг тўла энергиясига тенг бўлган ҳар қандай энергия бир хил эҳтимоллик билан берилиши мумкин. Шунинг учун, масалан, водород билан тўлдирилган сферик ионизацион камерани бир хил энергияли нейтронлар билан нурлантирилганда ундан нолдан бошлаб нейтрон энергиясигача мос келувчи қандайдир максимал амплитудага эга бўлган ҳар хил импульслар олиниши мумкин. Бундай камерадан амплитуда анализатори ёрдамида олинган импульслар спектрининг кўриниши зинапояга ўхшайди. Бунда камерага нейтронларнинг қандай келиб тушишининг аҳамияти йўқ. Импульснинг тўла амплитудаси бошланғич зарранинг ҳаракат йўналишига боғлиқ эмас. Шундай қилиб, агар тадқиқотчи водород билан тажриба ўтказиши натижасида зинапоя шаклидаги импульслар спектрини олган бўлса, камера бир хил энергияли нейтронлар билан нурланганлигига ишонч ҳосил қилиши мумкин. Бу энергиянинг қийматини энг катта импульсларнинг амплитудасига қараб аниқлаш осон. Агар камерага икки ёки уч хил энергияга эга бўлган нейтронлар тушаётган бўлса, ҳар бир группадан олинаётган импульсларнинг спектрларн умумий бир спектрга қўшилади. Бу спектрга мувофиқ ҳар бир группадаги нейтронлар энергиясини ҳам, уларнинг нисбий интенсивлигини ҳам аниқлаш қийин эмас.

Ядро реакциялари ёрдамида нейтронлар энергиясини ўлчаш яна ҳам қулайроқ. Ҳар хил энергияга эга бўлган нейтрон энергиясининг фақат бир қисми туртки ядро орқали кетади. Масалан, $He^3 + n \rightarrow H^3 + p$ реакцияда барча маҳсулотлар зарядланган зарралар бўлиб, уларнинг бутун энергияси муҳит атомларини уйғотишга ва ионизациялашга сарф бўлади. Бунинг натижасида энергиялари бир хил бўлган нейтронларда бўлиб ўтаётган ядро реакцияларида ҳосил бўлаётган импульслар бир хил бўлади. Бундан ташқари $He^3 + n$ ва бошқа кўпгина реакцияларда Q энергия ажралиб чиқади. Реакцияни жуда секин нейтрон вужудга келтирса ҳам ажралиб чиққан энергия катта электр импульси ҳосил қилишга етарли бўлади. Ядро реакцияси нейтронларининг импульслар спектри алоҳида чўққилардан тузилган бўлиб, уларнинг ҳар бири аниқ группадаги нейтронлар билан боғлангандир. Ҳар бир чўққининг жойлашувига қараб, одатдаги усул билан зарядланган зарраларнинг умумий энергияси топилади. Сўнгра реакция энергияси Q ни чиқариб, ҳар бир группа нейтронларнинг энергияси аниқланади.

Нейтронлар энергиясини аниқлашнинг баён этилган усуллари нисбатан содда, лекин ундаги ўлчаш аниқлиги унча юқори эмас: мумкин бўлган хато 5—10% дан кам бўлмайди. Шунинг учун учиб ўтиш вақти усули деб аталган усул ишлаб чиқилди. Бу усулнинг мазмуни қуйидагидан иборат. Нейтроннинг массаси аниқ бўлгани учун унинг энергиясини топишда тезлигининг қийматини билиш кифоя. Нейтрон тезлигини топиш учун маълум масофани босиб ўтиши учун сарфланган вақтни ўлчаш етарлидир. Шундай қилиб, масала вақтни ўлчашдан иборат экан. Бунинг учун нейтроннинг ҳаракат вақтини унинг пайдо бўлиш пайтидан бошлаб ҳисоблаш керак. Бу вақтни аниқ билиш учун нейтронлар пайдо бўладиган жуда қисқа ва аниқ вақт интерваллларини вужудга келтириш керак. Бошқача қилиб айтганда, нейтронларнинг импульсли манбаи керак. Бундай манбани кўп усуллар билан яратиш мумкин. Масалан, агар тез ионлар тезлатгич мишенига тегиши натижасида нейтронлар пайдо бўлса, махсус қурилма воситасида ион дастасини узиб туриш мумкин. Бунда ионлар мишенга доим тегмасдан, фақат жуда қисқа вақт интервалларидагина бориб тушади.

Бу интерваллларнинг давомлилиги 10^{-6}—10^{-8} секундгача етказилиши мумкин. Агар ядро реакторидан чиқаётган нейтронлар текширилаётган бўлса, нейтрон дастаси чиқаётган канал йўлига тор тирқиши бўлган тез айланувчи қалин цилиндр қўйилади. Бу цилиндр нейтрон дастасини қисқа муддатларда очиб туриш вазифасини бажаради. Энди тезлатгичнинг оғдирувчи системасини ёки айланаётган цилиндр механизмини вақт анализатори билан боғласак, нейтронлар пайдо бўлиш пайтидан бошлаб детекторда пайдо бўлиш вақтини ҳисоблаб бориш мумкин. Нейтрон қанчалик тез учса, йўлнинг охирида турган детекторга

шунчалик тез етиб боради. Детектордан олинаётган импульслар вақт анализаторига берилади. Агар анализаторнинг ҳар бир каналининг кенглиги 1 микросекунд бўлиб, нейтрон 10-каналда қайд қилинган бўлса, демак, у манбадан детекторга қадар 10 микросекундда учиб ўтган бўлади. Агар манба билан детектор орасидаги масофа 100 метр бўлса нейтроннинг тезлиги $100/10^{-5} = 10^7$ *м/сек* ёки 10^9 *см/сек* бўлади. Бундан унинг энергияси

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{18}}{2} = 500 \text{ кэв}$$

экани топилади.

Шундай қилиб, вақт анализаторининг ҳар бир канали қандайдир бир маълум энергияли нейтронларни қайд қилади, бу эса бир вақтнинг ўзида ҳар хил энергияли нейтронлар билан ўлчашлар ўтказиш имконини беради. Учиб ўтиш вақтини ўлчаш методи нейтронлар энергиясини ўлчашнинг энг аниқ усулларидан биридир.

Зарядларни ўлчаш усуллари. Ядролар ва элементар зарраларнинг электр зарядларини ўлчаш ҳақида кўп иш қилинди. Элементар зарядни дастлабки баҳолашлар Авогадро сони ва Фарадейнинг электролиз қонунлари асосида қилинган эди. Кейинчалик Милликен электрон зарядини аниқ ва тўғри ўлчаш усулини топдн. Ядроларнинг зарядларини Резерфорд ва Мозли ҳам аниқлаган эди. Барча элементар ядроларнинг зарядларн ишончли равишда аниқ ўлчанганлиги сабабли уларни қайта ўлчаб ўтиришнинг кераги йўқ. Асосий элементар зарралар бўлган протон ва электроннинг зарядларн ҳам худди шундай аниқликда ўлчанган. Лекин ҳар сафар илгари номаълум бўлган космик нурларда ёки кучли тезлатгичларда янги зарралар кашф қилинганда зарядни ўлчаш муаммосн намоён бўлади. Зарранинг заряди унинг энг муҳим характеристикаларидан биридир. Шунинг учун зарядни аниқлаш жуда актуал вазифадир. Зарядннг ишорасини аниқлаш қийин эмас: бунинг учун аниқ ўлчамларнинг кераги йўқ. Зарра магнит майдонидан қайси йўналишда бурилишини билиш етарли. Тажрибанинг соддалигига ва олинаётган маълумотларнинг аниқлигига қарамасдан зарядннг ишораси тўғрисидаги маълумотлар жуда муҳим натнжаларга олнб келишн мумкин. 1932 йилда Андерсен томонидан янги зарра — мусбат зарядланган электроннинг очилишини айтиш кифоя. Зарядннг абсолют миқдоринн аниқлаш эса анча мураккабдир. Бунда мураккаб ўлчаш ва ҳисоблашларсиз иш юришмайди, чунки зарранинг магнит ва электр майдонларда оғиши фақат заряд миқдорига эмас, балки энергияга ва ҳаракат миқдорига ҳам боғлиқдир. Ган ва Штрасман номаълум зарралар зарядларини ўлчаш йўли билан бўлиниш маҳсулотларнни ўрганишда бўлинишдан чиққан парчалар бошқа енгил элементларнинг ядролари эканлигига ишонишди. Лекин жуда аниқ ўлчанган бўлса ҳам бир марта ўлчанган натижаларни сўзсиз тўғри деб қа-

бул қилинавермайди. Шунинг учун даниялик физик Лассен бўлакларнинг зарядини магнит майдонида оғдириш йўли билан бевосита ўлчашга қарор қилди. Циклотронда тезлаштирилган оғир водороднинг ионларн — дейтронлар бериллий нишонга йўналтирилади.

$$Be^9 + d \rightarrow n + B^{10}$$ (бунда d — дейтрон, n — нейтрон)

реакция натижасида ҳосил бўлган нейтронлар ёнма-ён қўйилган юпқа уран қатламига тушиб, унинг ядроларини бўлади. Бўлиниш парчалари циклотроннинг магнит майдонида қандайдир ёй чизиб жуда юпқа фольга билан ёпилган махсус тирқиш орқали ионизацион камерага тушади. Қурилманинг тузилишини билган ҳолда бўлаклар траекториясининг радиусини топиш ва $p = \frac{eRH}{c}$ формула билан зарядниинг импульсга нисбатини ҳисоблаш мумкин. Бўлаклар зарядининг ўзини аниқлаш учун мустақил йўл билан уларнинг ҳаракат миқдорини аниқлаш керак. Ионизацион камерадан олинган импульслар амплитудасига қараб бўлаклар энергияси $E_б$ ва уран ядросининг массасини иккига бўлиш йўли билан бўлакларнинг $M_б$ массасини топиб, ҳаракат миқдорини қуйидаги формула билан аниқлаш мумкин:

$$p = \sqrt{2E_б \cdot M_б}.$$

Лассен қандай натижаларга эга бўлди? Агар Ган ва Штрассманнинг фарази тўғри бўлса, бўлакнинг ўртача заряди уран ядросн зарядининг ярмига тенг бўлиши керак, яъни 46 бўлиши керак эди. Агар ураннн нейтронлар билан нурлаганда трансуран элементлар ҳосил бўлганда эди, ҳосил бўлган зарраларнинг заряди 92 дан катта бўлиши керак эди. Бу нуқтаи назардан Лассен тажрибаси жуда кутилмаган натижа берди: бўлиниш натижасида ҳосил бўладиган зарраларнинг заряди 20—22 элементар зарядга тенг. Уран ядроси зарядининг ярми қаерга кетди? Ҳақиқатда эса, бошланғич нуқтаи назар тўғри экан. Уран ядроси фақат икки бўлакка бўлинади. Лекин бу бўлаклар α-заррага ўхшаш «яланғоч» бўлмай, собиқ уран атомининг ички қобиқларида жуда мустаҳкам боғланган электронларнинг бир қисмини ҳам олиб кетади. Бу электронлар қисман бўлак ядросининг зарядини (ҳақиқатан ҳам ўртача 46 га тенг) компенсация қилади, натижада бўлакнинг бутун заряди икки баравардан зиёдроқ камаяди. Бундан кейин тезлиги пасайган сари бўлак муҳит атомлари билан тўқнашиб электронлар қабул қилиб олади. Заряди борган сари камайиб, ниҳоят нолга тенг бўлади — бўлак элементлар даврий системасининг ўртасидаги нейтрал атомлардан бирига айланади.

Агар зарралар ёруғлик тезлигига яқин тезликлар билан ҳаракатланса, уларнинг зарядини аниқлаш анча енгиллашади. Зарядланган зарраларнинг модда билан таъсирланиш назариясидан шу нарса маълумки, бундай тезликларда зарра изининг

ионизация зичлиги унинг энергиясига ҳам, массасига ҳам деярлик боғлиқ бўлмай бутунлай зарядига боғлиқ бўлади. Бу ҳолда ионизация зичлиги зарра зарядининг квадратига пропорционал экан. Шунинг учун ионизация зичлигини ўлчаб (яъни 1 *см* масофадаги кумушнинг очилтирилган доначалари сонини ёки Вильсон камерасидаги томчилар сонини) ва олинган натижаларни ўша муҳитда жуда тез протоннинг ионизация зичлиги билан солиштириб тўғридан-тўғри зарра зарядини аниқлаш мумкин. Масалан, фотоэмульсияда зичлиги протон изининг зичлигидан 36 марта каттароқ бўлган из учраса, ишончли равишда айтиш мумкинки, бу изни заряди $\sqrt{36}=6$ га тенг бўлган углерод ядроси қолдирган. Бу усуллар билан бирламчи космик нурларнинг тахминан 80% и протонлар ва 20% и α-зарралардан иборат эканлиги аниқланди. Уларнинг ичида бор, углерод, азот, кислород ва ундан ҳам оғирроқ элементларнинг ядролари жуда камдан-кам бўлса ҳам учраб туради. Элементар зарраларнинг зарядлари ўрганилганда қизиқарли ва муҳим маълумотлар олинди. Ҳозирги замонда бундай зарраларнинг 200 дан ортиғи маълум. Уларнинг хусусияти жуда хилма-хилдир: уларнинг ҳаммаси ҳар хил массага эга, баъзи бирлари турғун, баъзи бирлари жуда кичик вақт ичида парчаланади. Лекин барча элементар зарраларнинг электр зарядлари 0 га ёки ± 1 га тенг. Шундай қилиб, электрон заряди ҳақиқатан ҳам электр кванти бўлиб, энг элементар заряддир. Бу зарядни кичикроқ қисмларга бўлиш мумкин эмас. Лекин биз ҳозирча бундай гапларни қатъий айтмаймиз, чунки қачонлардир атом ҳам бўлинмас деб ҳисобланилар эди. Электроннинг заряди билан унинг ўлчамлари ҳақидаги тушунча мустаҳкам боғлангандир. Электроннинг радиусини бевосита ҳали ҳеч ким ўлчамаган, ўлчаб бўлмаса ҳам керак, чунки ҳозирги вақтда электроннинг бошқа жисмлар билан ўзаро таъсирлашувининг фақатгина бир кўриниши, яъни электрон ва магнит майдонлари кучи орқали таъсири маълум. Аммо бу кучлар масофага тескис боғлиқ. Шу сабабли бирорта ҳам ҳодиса электроннинг чегараси қаердан ўтишини ёки унинг умуман борлигини кўрсата олмайди.

Балки электрон кескин чегараси бўлмаган ёйилган булутдир, ёки, аксинча, геометрик нуқта маркази бўлиб, ўзидан электр майдони куч чизиқларини чиқарар.

Аммо бир қатор муаммоларни назарий муҳокама қилганда электрон r_e радиусга эга бўлган текис зарядланган шарча деб қабул қилиш қулай. Бундай шарчанинг электр энергияси e^2/r_e га тенг. Иккинчидан, нисбийлик назариясига мувофиқ ҳар қандай зарранинг энергияси m_0c^2 га тенг. Бу ифодаларни тенглаштириб қуйидагини оламиз:

$$r_e = \frac{e^2}{m_0c^2}.$$

Агар бу формулага маълум катталиклар (e, m_0, c) ни қўйсак, r_e учун $2{,}81\cdot10^{-13}$ *см* га тенг қиймат келиб чиқади Бундай йўл

билан топилган r_e катталик ***электроннинг классик радиуси*** дейилади. Яна бир марта таъкидлаб ўтиш керакки, r_e — шартли параметр, электроннинг ҳақиқий ўлчамлари эса бутунлай бошқача бўлиши мумкин.

Шундай қилиб физиклар, катталиги *CGSE* бирликлар системасида қиймати 10^{-10} га тенглашадиган зарядларни ҳам ўлчашни ўргандилар. Лекин фан эришилган ютуқларда тўхтаб қолмайди, назария тўхтовсиз тараққий қилади. Эксперимент ўтказиш техникаси мукаммаллашмоқда, бунинг натижасида янги тадқиқотлар, янги кашфиётлар қилиш имконияти вужудга келяпти. Асримизнинг бошида биринчи марта ядронинг электр заряди ўлчанди, 50 йилдан кейин эса бу зарядниинг ядро ҳажмида тақсимланишини экспериментал ўрганишга киришилди. Бу экспериментнинг одатдан ташқари эканлигини тушунтириш учун ядронинг ҳажми 10^{-37} $см^3$ дан кам эканлигини айтиб ўтишнинг ўзи кифоя! Бу эксперимент нима учун керак эди? Ядронинг заряди унда протонлар мавжудлиги билан боғлиқдир, шунинг учун заряд тақсимоти ҳақидаги маълумотлар бизга ядро структураси ҳақида маълумотлар беради. Бу эса ядро структураси назариясини яратиш учун жуда муҳимдир. Ядро текис зарядланган заррадан иборат, яъни унда протонлар нейтронлар билан текис аралашган деб фараз қилиш жуда ҳам қулай. Лекин ядродаги электростатик кучлар бир хил зарядланган протонларни бир-биридан итаради. Натижада протонлар ядро сиртида жойлашган деб ҳисоблаш ҳам мумкин, бу ҳолда ядро марказидаги заряд зичлиги унинг сиртидаги заряд зичлигидан кичик бўлади. Биринчи қарашдан қизиқ кўринса-да, тескари нуқтаи назарни ҳам асослаш мумкин бўлди: бу назарияга кўра, протонлар ядронинг марказида бўлиши керак. Ўтказилган эксперимент бунн ҳал қнлиши керак. Эксперимент 100 *Мэв* энергияга эга бўлган жуда тез электронлар ҳар хил моддаларнинг юпқа катламлари томонидан сочилишини кузатишдан иборат эди. Эксперимент давомнда у ёки бу бурчакка сочнлган электронлар сони ўлчанди. Бунинг учун электронлар детектори нурлантирилаётган намуналарга нисбатан ҳар хил ҳолатларга қўйилган. Эксперимент натижалари қайд қилинган электронлар сонининг сочилиш бурчагига боғлиқлигини кўрсатадиган эгри чизиқ сифатида тасвирланди. Хўш, бу ерда ядронинг ва ундаги зарядлар тақсимотининг нима алоқаси бор? Шуни ҳисобга олиш керакки, нишонга тушаётган жуда тез электронларга атом қобиқларининг электронлари халақит беролмайди. Кучли зарядлар тўпланган оғир ядрода эса гап бошқача, албатта; тез электрон ядродан ҳам ўтади, лекин барибир ядронинг кучли электр майдони электронни бир томонга оғишга мажбур қила олади. Ядронинг бутун заряди бир нуқтага тўпланган деб фараз қилиб, ундан ҳар хил масофада учиб ўтаётган электронларни кўрайлик. Электрон ядрога қанча яқин масофада учиб ўтса, унга таъсир қилаётган куч шунча катта бўлади ва у бошлангич

йўналишдан шунчалик четга бурилади. Лекин кўриниб турибдики, ядродан узоқроқдан учиб ўтаётган электронлар сони, яқинроқдан ўтаётган электронлар сонидан анча кўпдир. Шунинг учун кичик бурчакларга оғиш сони доим кўп бўлади ёки бу бурчакка сочилиш эҳтимоллигини назарий ҳисоблаб чиқиш ва сочилган зарраларнинг сочилиш бурчагига боғланишини эгри чизиқ билан тасвирлаш мумкин. Энди бошқа ҳолни, ядро заряди бир нуқтага тўпланмаган, яъни қандайдир сферик ҳажм бўйича ёйилган ҳолни кўрамиз. Бу ҳолда ҳар бир электрон олдинги ҳолатдагига қараганда кучлироқ оғганлигини кўриш мумкин, чунки энди зарядниинг бир қисми уни қарама-қарши томонга тортади. Натижада кичик бурчакларга оғиш эҳтимоллиги ортади ва сочилган зарралар сонининг оғиш бурчагига боғлиқлигини кўрсатувчи эгри чизиқ янада қияроқ тушади. Бу эгри чизиқнинг аниқ кўриниши заряднинг ҳажм бўйича қандай тақсимланганлигига боғлиқ.

Бу тажрибалардан ядрода заряд нотекис тақсимланганлиги аниқланди. Ядронинг ўрта қисми заряд зичлиги тахминан доимий бўлиб, чеккаларида эса, у аста-секин камаяди. Шундай қилиб, ядро аниқ чегарага эга эмас. Шунинг учун у қаттиқ шарчага ҳам, суюқлик томчисига ҳам ўхшамай, кўпроқ чеккалари ёйилган булутга ўхшайди. Протон учун олинган натижалар ҳам худди шундай бўлганлиги янада таажжубланарли ҳолдир: протоннинг заряди ҳам «ёйилган» экан.

Митти зарралар массасини ўлчаш. Зарранинг заряди уни характерловчи муҳим белгиларидан биридир. Ядролар ва зарралар ҳақидаги маълумотларни уларнинг массаларини ўлчаш натижаларидан билиш мумкин. Перрен тажрибалари натижасида грамм-атомдаги атомлар сонини аниқлаш мумкин бўлгандан кейингина биринчи марта зарранинг массасини ўлчаш масаласи ойдинлашди. Бундан кейин Томсон изотопларни ажратишда ва уларнинг массасини ўлчашда ядро физикаси соҳасида муҳим ҳисса қўшди. Кейинги вазифалар олинган натижаларни аниқлаш ва барча изотопларнинг массаларини ўлчашдан иборат бўлиб қолди. Дастлабки пайтларда ҳар бир экспериментатор ўзига керак бўлган асбобларни ўзи яратар эди. Ҳозир эса атомларнинг массалари заводларда чиқариладиган ***масс-спектромепр*** ва ***масс-спектрограф*** деб аталадиган асбоблар билан аниқланади.

Томсон тажрибаси мисолида электр ва магнит майдонларни қўшиб ишлатиш зарралар тезликларидаги ҳар хилликни йўқота олиши кўрсатилган эди: бир хил массага, лекин ҳар хил бошланғич тезликка эга бўлган зарралар бир параболага тушади. Ҳозирги замон асбобларида майдонларни махсус қўшиш йўли билан икки карралик фокуслашга эришилади. Бунда бир хил массага ва ҳар хил тезликка эга бўлган ионлар параболанинг узун тармоғи бўйича сочилмасдан амалда бир нуқтага тушади, бунинг натижасида кузатилаётган эффект (ток кучи ёки плас-

тинканинг қорайиш даражаси) кучаяди. Ишлашдан олдин асбоб градуировка қилинади. Бунинг учун унга массаси маълум бўлган ионлар (масалан, углерод ионлари) киритилиб, магнит майдони шу ионларни қайд қилувчи системага тушадиган даражада танлаб олинади ва текширилиши лозим бўлган модда ионлари киритилади. Улар қайд қилувчи системага бориб тушиши учун майдонларни ўзгартиришга тўғри келади. Зарраларнинг электр ва магнит майдонида огиш даражаси уларнинг массасига тескари пропорционал бўлгани учун эксперимент натижаларига қараб текширилаётган атомлар массаси углерод массасидан қанча фарқ қилишини ва, шундай қилиб, модданинг атом оғирлигини аниқлаш мумкин. Ҳозирги масспектрограф ва масспектрометрларнинг ажрата олиш қобилияти жуда юксак.

Ҳозирги пайтда асосий изотоплар атомларининг массалари олтинчи белгигача аниқликда ўлчанган. Автомобиль массасини шундай аниқликда ўлчанганда, қилинган хато бир неча граммдан ошмас эди — унинг ғилдиракларидаги чанг ҳам бундан огирроқ!

30- йилларнинг ўрталарида физиклар модда уч хил зарралардан: электрон, протон ва нейтронлардан иборат эканлигини билар эдилар. Ундан ташқари мусбат электрон — позитрон ва гамма-квантлар ҳам маълум эди. Бета-емирилишда ҳосил бўладиган нейтрал зарра — нейтрино ҳақидаги тахминлар бор эди. Олам ана шу асосий «ғишт»лардан тузилган деб ҳисобланар эди.

1936 йили Андерсон ва Неддермейер космик нурларни кузатаётиб (худди шундай тажрибалардан позитрон кашф қилинган эди), электронга жуда ўхшаш, лекин ундан фарқ қиладиган заррани учратдилар. Улар ўз тажрибаларида кучли магнит майдонига жойлаштирилган ва ўртасидан қўрғошин ёки бошқа бирор металл пластинкаси билан тўсиб қўйилган Вильсон камерасидан фойдаланган эдилар. Эгрилик ўзгаришини кузатиб, зарраннг қўрғошиндаги тормозланиши билан боғлиқ ҳаракат миқдори сарфини аниқлаш мумкин эди. Айтиб ўтилганидек, юксак энергияли электронлар ўз энергиясини тормозлн нурланиш чиқариши натижасида йўқотади. Электроннинг массаси кичик бўлгани учун ядро билан ўзаро таъсирлашиш пайтида у кучли тормозланади, натижада вужудга келадиган нурланиш анча интенсив бўлиб, энергиянинг катта қисмини олиб кетади. Шу сабабли электрон изининг пластинкагача ва ундан кейинги эгрилиги бир-биридан кучли фарқ қилиши керак. Баъзи ҳолларда худди шундай аҳвол кузатилди, бироқ бошқа ҳолларда эса, излар эгрилигининг қалинлиги ҳатто 1 *см* бўлган платина пластинкадан кейин ҳам ўзгармади. Зарраннг бундай катта сингувчанлиги унинг нурланишга жуда кам энергия сарфлашини ва массаси электрон массасидан анча катта эканлигини кўрсатади. Изининг зичлиги эса худди электронникидай бўлиб, бу зарраннг заряди абсолют қиймати бўйича элементар зарядга тенг

эканлигини кўрсатади. Бунинг қандай зарра эканлигини билиш учун массасини аниқ ўлчаш лозим эди.

Бу масалани ечишнинг қийинлиги шундан иборат эдики, тажрибада бевосита кузатиладиган катталиклар (траектория радиуси, ионизация зичлиги, югуриш йўлининг катталиги, импульснинг амплитудаси)дан бирортаси ҳам фақат массагагина боғлиқ эмас. Шу сабабли, массани аниқлаш учун ҳар гал бу катталиклардан ҳеч бўлмаса иккитасини ўлчаш керак бўлди. Зарранинг югуриш йўли анча катта ва Вильсон камераси ҳажмида жойлашмайдиган бўлгани учун космик нурлар зарраларининг массасини ўлчайдиган биринчи қурилма бир-бирининг устига қўйилган иккита Вильсон камерасидан иборат эди. Биринчи камера магнит майдонига жойлаштирилиб, иккинчисининг ичига бир неча юпқа қўрғошин пластинкалар киритилган эди. Ҳавога нисбатан қўрғошин зарраларни жуда кўп марта кучлироқ тормозлайди, лекин шундай бўлса ҳам зарра, айтайлик, тўртта пластинкани тешиб ўтиб бешинчисида тўхташи мумкин. Шундай қилиб, қурилма зарранинг биринчи камерадаги траектория радиуси бўйича импульсини ва иккинчи камерада унинг қўрғошиндаги югуриш йўлини ўлчаш имконини беради. Бундан зарранинг массасини ҳам топиш мумкин. Бу тажрибанинг натижаси жуда кутилмаган бўлди: сингувчи зарраларнинг массаси электрон массасига қараганда тахминан 200 марта катта экан, протон эса электрондан 1836 марта оғир. Электрон билан протоннинг ўртасидаги жойни эгаллайдиган янги зарра бор эканлигини тан олиш керак бўлиб қолди. Бу зарра ***мезон*** деб аталади.

Космик нурлардан ташқари табиатнинг бирор ҳодисасида ҳам мезонлар учрамаганлиги сабабли улар турғун эмас ва вақт ўтиши билан қандайдир бошқа зарраларга айланади деб тахмин қилинди. Дарҳақиқат, тез орада фотоэмульсияларда бу зарралар электрон ва икки нейтрино чиқариб парчаланиши маълум бўлди:

$$\mu^+ \to e^+ + 2\nu,$$
$$\mu^- \to e^- + 2\nu,$$

бундаги (+) ва (—) белгилар зарраларнинг электрон зарядини кўрсатади. Мезоннинг парчаланиш схемасини ўрганиш унинг массасини аниқлашга ёрдам берди. Электроннинг массаси мезон массасининг $^1/_{200}$ қисмини ташкил қилади. Шуни олдиндан айтайликки, нейтриноларнинг массаси электрон массасига қараганда ниҳоятда кичик. Демак, ҳосил бўлган зарралар массаларининг йиғиндиси мезон массасидан анча кичик. Бу массанинг асосий қисми қаерга кетади? Бу саволга нисбийлик назарияси жавоб беради: мезон билан ҳосил бўлган зарралар массалари орасидаги фарқ ҳосилавий зарраларнинг кинетик энергиясига айланади. Бу энергияни Эйн-

штейннинг маълум $E=\Delta mc^2$ формуласи орқали топамиз. Бу қуйидагича ёзилади:

$$E_e+2E_\nu=[m_\mu-(m_e+2m_\nu)]\cdot c^2$$

Нейтрино массаси электрон массасидан кўп марта кичик бўлгани учун, бу формулада m_ν катталикни ҳисобга олмасак ҳам бўлади. У ҳолда:

$$E_e+2E_\nu=(m_\mu-m_e)c^2.$$

Электрон энергиясини ҳеч бўлмаса унинг фотоэмульсиядаги югуриш йўли орқали ҳам топиш мумкин. Нейтрал зарра—нейтринони қайд қилиш ва унинг энергиясини ўлчаш мумкин эмас экан. Лекин кўп тажрибалар ўтказиб ва ҳар бирида электрон энергиясини ўлчаб, мезон парчаланганда электрон қандай максимал энергияга эга бўлиши мумкинлигини аниқлаш мумкин. Иккала нейтрино аниқ қарама-қарши томонга учиб кетганда электрон максимал энергияга эга бўлади. Ҳаракат миқдорининг сақланиш қонунидан нейтринонинг умумий импульси ($2p_\nu$) электрон импульсига тенг бўлиши керак, яъни $p_e=2p_\nu$. Юқори энергияларда ҳар қандай зарраннг ҳаракат миқдори ўз энергияси билан $E=pc$ муносабатда боғланганлиги сабабли электроннинг максимал энергияси икки нейтринонинг энергиясига тенг бўлади:

$$(E_e)_{max}=2E_\nu.$$

Демак, мезон массаси учун юқорида ёзилган ифодани ўзгартиб ёзиш мумкин:

$$2(E_e)_{max}=(m_\mu-m_e)\cdot c^2.$$

Бунда мезон массасидан бошқа ҳамма катталиклар энди маълум. Мезонларнинг парчаланиш энергиясини кўпдан-кўп ўлчашлар уларнинг массаси 207 электрон массасига тенг эканлигини кўрсатди.

1947 йилда Пауэлл космик нурларда, кейинги йили эса Гарднер ва Лэтесс тезлатгичнинг нурланишида массаси 300 электрон массасига яқин зарраларни кашф қилдилар. Бу янги зарралар ***π-мезонлар*** деб аталди. Ундан кейин 966 m_e массали ***K-мезонлар*** кашф қилинди. Протондан каттароқ массага эга бўлган — ***гиперонлар*** деб аталган зарралар мавжудлиги ҳам тасдиқланди. Янги зарраларни қидириш ҳозир ҳам давом этмоқда.

Айтилганлардан кўриниб турибдики, янги зарранинг очилиши унинг массасини ўлчашдан ажралмасдир, шунинг учун бу проблемага алоҳида эътибор берилади. Массани аниқлаш учун ҳозирги замон техникасининг барча экспериментал воситалари: фотоэмпульциялар, Вильсон камералари, кучли магнит билан ишлатиладиган счётчиклар системаси ва муҳими Эйнштейн муносабатига асосланган ҳисоблашлардан фойдаланилди.

Ядро физикасининг қудратли муваффақиятлари: ҳамма нарса ўлчаниб бўлди, энди ядрочи-физиклар ўз касбини ўзгартири-

ши керак, деган таассурот туғдириши мумкин. Амалда эса бизга ҳали ядро ва элементар зарралар ҳақида жуда кам нарса маълум. Ўлчаниши нисбатан осон бўлган нарсаларгина ўлчанди, холос.

Элементар зарраларни диққат билан ўрганиш, уларнинг параметрларини аниқ ўлчаш, уларнинг ички тузилишини билишда жуда катта аҳамиятга эга. Ядро физикаси эндигина туғилаётган асрнмизнинг бошларидаёқ В. И. Ленин: «электрон ҳам атом каби битмас-тугалмасдир, деган эди. Сўнгги ярим аср давомида тўпланган материаллар Ленининнинг гениал гояси тўғри эканлигини тасдиқлайди.

Шубҳа йўққи, ўзини ядро физикасига бағишлаган одамларнинг ўткир кўзи ва чуқур ақлидан нейтрино ҳам, тортишиш майдонининг кванти — гравитонлар (буларнинг мавжудлиги ҳақида олимлар ҳозир ҳам тортишмоқдалар) ҳам ўз сирларини яшириб қололмайдилар.

Совет физикларининг ҳозирги замон фани ривожига қўшган ҳиссалари

Совет физиклари ҳозирги замон физикасига катта ҳисса қўшдилар. СССРда фан ва техниканинг жадал ривожланиши ишлаб чиқариш усули ва ижтимоий тузумда рўй берган революцион тўнтариш асосида юз берди. Совет фани, шу жумладан, физика фани қийин шароитларда ижод этган рус олимлари Ломоносов, Петров, Лобачевский, Ленц, Менделеев, Якоби, Столетов, Циалковский, Жуковский, Умов, Лебедев, Попов ва бошқалар яратган буюк кашфиётларга таяниб ривожланди.

Совет ҳокимияти йилларида мамлакатимизда илмий-текшириш институтлари, лабораториялар, олий ўқув юртлари ташкил этилди. Фан ва техниканинг турли соҳаларида мутахассислар етишиб чиқмоқда. Совет Иттифоқининг космик фазони ўрганишда эришган катта ютуғи ва бу соҳада биринчи ўринни эгаллашлигн ҳаммага маълум. Саноатнинг муҳим тармоқларидан ҳисобланган радиоэлектроника, химия, металлургия ва бошқаларни ривожлантирмасдан Ер ва Ой сунъий йўлдошларини, космик ракета ва кемаларни яратиш мумкин эмас эди.

Совет Иттифоқи космик фазони ўрганиш ва ўзлаштириш, фақат ракета техникаси бўйича биринчилар қаторида бўлиб қолмай, атом энергиясидан тинчлик мақсадларида фойдаланиш, термоядро реакцияларини ўрганиш, фан ва техниканинг бошқа соҳаларида ҳам биринчилар қаторида туради. Эндиликда бизда илғор атом саноати ва ракета техникаси мавжуд.

Совет олимлари атом ядроси, элементар зарралар физикаси, космик нурларни ўрганиш ва зарраларни сунъий тезлаштиришда янги методлар яратиш соҳасида ҳам жуда катта ютуқларга эришди. Квант электротехника соҳасида олиб борилган тадқиқотлар натижасида дециметр, сантиметр ва оптик диапа-

зондаги электромагнит тўлқинлар генераторлари ва кучайтиргичлари яратилди. Ҳисобловчи ва бошқарувчи машиналарнинг яратилиши илмий ишларни ишлаб чиқаришни ривожлантиришда катта роль ўйнамоқда. Совет олимлари оптика, қаттиқ жисм ва паст температуралар физикаси, дифференциал тенгламалар назарияси, эҳтимоллик назарияси, сон назарияси, функционал анализ ва бошқа фан соҳаларида муҳим натижаларни қўлга киритдилар.

Ҳозирги замон физикасини ривожлантиришда П. П. Лазарев, А. Ф. Иоффе, Д. С. Рождественский, С. И. Вавилов, И. В. Курчатов, Л. И. Мандельштам, Г. С. Ландсберг, Л. Д. Ландау, А. И. Алиханов, А. И. Алиханян, В. А. Фок, Д. В. Скобельцин, П. Л. Капица, В. И. Векслер, А. Л. Минц, Д. И. Блохинцев, Н. Н. Боголюбов, П. А. Черенков, И. М. Франк, Г. Н. Флеров, Н. Г. Басов, А. М. Прохоров ва бошқа кўпгина совет физикларининг ҳиссаси жуда катта.

Чунончи, 1928 йили совет олимлари Л. И. Мандельштам ва Г. С. Ландсберг ҳинд физиги Ч. Раман билан бир вақтда комбинацион сочилиш деб ном олган ҳодисани кашф этдилар. Комбинацион сочилиш молекулалар тузилишини ва молекулалараро кучларни ўрганишда қўлланилади.

1934 йили С. И. Вавилов иштирокида унинг аспиранти П. А. Черенков радийдан чиқадиган гамма-нурлар таъсирида тоза суюқликларнинг нурланиш ҳодисасини ўрганиб, «Вавилов — Черенков эффекти» деб ном олган ҳодисани кашф этдилар ва унинг хусусиятларини ўрганиб чиқдилар. Ўз кашфиётининг аҳамияти ҳақида П. А. Черенков шундай деб ёзган эди: «Ёруғлик тезлигидан катта тезликка эга бўлган зарраларнинг нур сочиш хусусиятини ўрганиш В. И. Ленининг материя чексизлиги ва объектив реалликни ўрганиш процессининг чегарасизлиги ҳақидаги фалсафий тезисини тасдиқловчи ва конкретлаштирувчи бой табиий-илмий материални вужудга келтирди»[1].

Вавилов — Черенков нурланиш назариясини Н. Е. Тамм ва И. М. Франк ишлаб чиқди. 1946 йили бу ажойиб тадқиқот учун Вавилов, Черенков, Тамм ва Франкка биринчи даражали Давлат мукофотн берилди; 1958 йили эса Швеция Фанлар Академияси совет олимларига Нобель мукофотини берди.

Вавилов, Черенков нурланишининг кузатилиши зарядли зарраларнинг тезлиги ва йўналишини ўлчашда энг қулай усулни яратиш имконини берди. Бу эффект асосида яратилган асбоб Черенков счётчиги дейилади. Антипротонларни кашф этиш ва ўрганишда бу асбоб жуда катта аҳамиятга эга бўлди.

Академик С. И. Вавилов люминесценция, ёруғлик назарияси, янги ёруғлик манбаларини яратиш ва люминесцент анализ соҳаларида қилган тадқиқотлари билан ҳозирги замон физикасига катта ҳисса қўшди. С. И. Вавилов ишлари П. Н. Лебедев

---

[1] «Вопросы философии» журнали, 1959 йил, 9-сон, 125-бет.

ишлари сингари ёруғлик ҳақидаги материалистик таълимотни ривожлантиришга ёрдам берди ва физиканинг бу соҳадаги идеалистик қарашларига зарба беришда катта аҳамиятга эга бўлди.

Оптиканн ривожлантиришда Д. С. Рождественский, А. Н. Теренин, В. Л. Левшин ва бошқалар кўп ишлар қилди. Улар олиб борган тадқиқотлар материя ҳақидаги бизнинг илмий материалистик тасаввурларимизни чуқурлаштириш билан бир қаторда, металлургия, машина қурилишн, қишлоқ хўжалиги, медицина ва ҳарбий мақсадларда кенг қўлланилди.

Ярим ўтказгичлар ҳозирги замон техникасининг кўп тармоқларини ривожлантиришда катта аҳамиятга эга. Ярим ўтказгичлар техникасини яратишда академик А. Ф. Иоффе катта ҳисса қўшди. Ярим ўтказгичлар хусусиятинн ўрганишда ва термоэлектрик генераторлар назариясини яратишда қилган ишлари учун унга Ленин мукофоти берилган.

Совет олимлари Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси, А. А. Андроновларнинг чизиқли бўлмаган тебранишлар назарияси бўйича олиб борган тадқиқотлари радиотехниканн ривожлантиришда алоҳида ўрин тутади.

Атом ядроси физикаси ва космик нурлар физикасини ўрганишда ака-ука Алиханов ва Алиханянларнинг хизматлари ниҳоятда катта. Улар нейтрнпони аниқлаш учун K — қамраш усулини муваффақиятли таклиф қилдилар, ядронинг қўзғалиш энергияси 1 *Мэв* дан ортса, ядро асл ҳолатига қайтишда электрон — позитрон жуфтини ҳосил қилишнин кўрсатдилар, радиактив ядролар гамма спектрларини, космик нурлар составини ўрганиш учун махсус магнит — спектрометрлар яратдилар. Академик А. И. Алиханов биринчи бўлиб оғир сувли гомоген атом реакторини ишга туширди. Бу типдаги реакторлар атом энергиясини тинчлик мақсадларида фойдаланишда кенг ишлатилмоқда.

Космик нурлар физикасини ривожлантиришда Д. В. Скобельцин катта хизмат қилди. 1924—1927 йилларда у ишлаб чиққан магнит майдонига жойлаштирилган Вильсон камераси билан ишлаш усули атом ядроси ва космик нурларни ўрганишда асосий усул бўлиб хизмат қилди. У Вильсон камерасини магнит майдонига жойлаб, гамма-нурларини батафсил ўрганди, космик нурларнинг тарқалиш йўналишини ва унинг расмини олди. Шунингдек, у 1927—1929 йилларда биринчи бўлиб ядро физикаси учун муҳим аҳамнятга эга бўлган космик нурлар жаласини кузатди.

Космик нурлар таркибида учрайдиган катта энергияли зарралар атом ядросини бомбардимон қилиш мақсадларида фойдаланнлди. Элементар зарраларни тезлаштириш йўли билан ҳозир катта энергияли зарралар оқимнни ҳосил қилиш мумкин. Лекин жуда катта энергияли зарралар фақат космнк нурлар таркибида учрайди. 1930—1950 йилларда бу нурлар таркибида позитрон,

мусбат ва манфий зарядли μ — мезонлар зарядланган ва нейтрал π — мезонлар, оғир K — мезонлар, Λ — гиперонлар топилган.

Совет физиклари космик нурлар табиатини текширишда ҳам илғор ўринни тутади. Улар атмосферанинг юқори қатламларида бирламчи космик нурлар портлаш характерига эга бўлган жаласимон процесслар ҳосил қилишини аниқладилар. Кейинчалик шу процесс вақтида электрон ва протонлар ҳосил бўлиши аниқланди. Совет физиклари космик нурларни ҳосил қилувчи бирламчи нурланиш протонлардан иборат эканлигини исботладилар.

Д. В. Скобельцин раҳбарлигида кўп йиллар ишлаган С. В. Вернов (радио сигналлар ёрдамида) стратосферадаги космик нурларни оригинал кузатиш методини ишлаб чиқди. Ернинг ички радиацион поясини Америка олимлари очган бўлса, космик ракета ва Ернинг сунъий йўлдошлари ёрдамида С. В. Вернов, А. Е. Чудаков, Н. В. Пушков, Ш. Ш. Долгинов Ернинг ташқи радиацион зонасини кашф этдилар ва ўргандилар. Бу ишлари учун улар 1960 йили Ленин мукофоти олган эдилар.

И. В. Курчатовнинг ядро физикаси, термоядро реакцияси, атом техникаси соҳасида қилган ишлари ҳозирги замон фани ва техникасига катта ҳисса бўлиб кирди. 1934 йили И. В. Курчатов сунъий радиоактивлик ҳодисасини ўргана бошлади. Бу ишлари натижасида 1935 йили у ядро физикасининг қизиқ ҳодисаларидан бири бўлган радиоактив элементлар ядро изомериясини кашф этди. Ядро изомерияси ҳодисасининг очилиши ва тадқиқот атом ядроси тузилиши ҳақидаги тушунчамизни бойитишда катта аҳамиятга эга. 1940 йили И. В. Курчатов раҳбарлигида қилинган ишлар натижасида радиоактивликнинг янги кўриниши — уран ядроларининг ўз-ўзидан парчаланиши аниқланди.

Иккинчи жаҳон урушига қадар кўп физиклар атом энергиясидан яқин орада фойдаланиш мумкин бўлмайди, деб ҳисоблар эди. 1930 йилдаёқ совет олимлари томонидан атом энергиясидан тинч мақсадларда фойдаланиш имкони борлиги аниқланди. Лекин гитлерчилар Германиясининг СССРга хоинларча қилган ҳужуми уран ядросини парчалаш устида олиб борилаётган тадқиқот ишларини вақтинча тўхтаб қолишига сабаб бўлди. 1943 йилнинг ёзидан бошлаб Москвада атом энергиясидан тинчлик мақсадларида фойдаланиш бўйича СССР Фанлар Академиясининг махсус лабораторияси ишлай бошлади. Кейинчалик бу лаборатория асосида Атом энергияси институти ташкил этилди.

1942 йилда АҚШда Роберт Оппенгеймер раҳбарлигида махфий лаборатория ташкил этилди. Унинг олдига атом қуролини ясаш вазифаси қўйилди. Махфий равишда АҚШ бутун дунёдан йирик физикларни тўплай бошлади. 1945 йилнинг ўрталарида Оппенгеймер лабораториясида учта атом бомбаси ясалди. Уларнинг бири 1945 йил 16 июнда Аламогордодаги полигонда порт-

латиб синаб кўрилди ва иккитаси ўша йилнинг августида Хиросима ва Нагасакига ташланди.

Америка давлат арбоблари урушда катта талофот кўрган Совет Иттифоқи ҳали-бери атом қуролини ишлаб чиқаролмайди, деб ўйлаган эдилар. Лекин совет олимларининг тинмай ишлаши натижасида 1947 йили мамлакатимиз атом қуролига эга бўлди. 1953 йилда эса, СССРда биринчи водород бомбаси синаб кўрилди. Америкада эса водород бомбаси 1954 йилда синалди.

Улуғ Ватан уруши даврида, айниқса ундан кейинги йилларда совет ядро физикаси бой техника билан жиҳозланди. Ҳозирги вақтда Дубнада 10 миллиард электрон-вольтли ва Серпуховда 70 миллиард электрон-вольтли синхрофазотрон деб аталувчи жуда катта протон тезлатгичи, Ереванда эса Европада биринчи энг йирик электрон (6 миллиард электрон-вольт) тезлатгичи ишлаб турибди.

1950 йилдаёқ Совет Иттифоқида термоядро реакциясини ўрганиш бўйича иш бошлаб юборилган эди. Аввал бу ишлар фақат СССР Фанлар Академиясининг Атом энергияси институтида олиб борилган бўлса, ҳозир Москва, Ленинград, Украина, Сибирь, Грузия илмий текшириш институтларида олиб борилмоқда.

Жаҳон олимларининг куч-ғайрати термоядро реакциясини ўрганиш ва унинг энергиясидан тинчлик мақсадларида фойдаланишга қаратилган. Бу масалани ҳал қилишда ҳам совет олимларининг хизмати катта. 1950 йилнинг ўрталарида Л. А. Арцимович ва М. М. Леонтович Атом энергияси институтининг бошқа илмий ходимлари билан биргаликда юқори температурали плазмани олиш мақсадида биринчи бўлиб газлардаги кучли импульсли разрядларни текшира бошладилар.

Яқинда И. В. Курчатов номидаги СССР Фанлар Академиясининг Атом энергияси институтининг Л. А. Арцимович раҳбарлигидаги плазмаларни ўрганиш бўлимида биринчи марта турғун, юқори зичликка эга бўлган юқори температурали (қирқ миллион градус атрофида) плазмани олишга муяссар бўлинди. Плазмани маълум вақтгача ушлаб туриш учун мураккаб геометрик шаклдаги магнит майдони ишлатилди. Плазмани ушлаб туриш вақти секуднинг юздан бирига қадар олиб борилди. Бу эса Совет физикларининг катта ютуғидир.

Г. Н. Флеров, В. А. Карнаухов, Т. М. Тер-Акопян ва бошқа Совет физиклари кўп зарядли ионларни циклик тезлатгич ёрдамида (Дубнада) радиоактивликнинг янги кўриниши — протон радиоактивлигини кашф этдилар.

50-йиллар бошида Н. Г. Басов ва А. М. Прохоров радиотўлқинларни генерациялаш ва кучайтиришнинг янги принципини — молекуляр генератор ва кучайтиргичларни яратдилар. Квант электроникасини ривожлантириб юборган бу ишлари учун совет олнмларига Ленин ва Нобель мукофотлари берилди.

Совет олимларининг электроника ва радиотехника соҳасида эришган ютуқлари фан ва техниканинг автоматика ва телемеханика, радиоспектроскопия, радиоастрономия ва бошқа тармоқларнни ривожлантириб юборишда муҳим роль ўйнади. Охирги ўн-ўн беш йил ичида бизда ва чет мамлакатларда ишлатилаётган физик асбоб-ускуналар жуда ўзгарнб кетди. Ҳозирги замон табиғёт фанларида юз бераётган революцион ўзгаришлар тажриба техникасининг ўзгариши билан боғланган.

XIX аср охирн ва XX аср бошларида физика лабораториялари содда, асосан қўлда ясалган асбоб ва қурилмалар билан жиҳозланган бўлса, ҳозир аҳвол бутунлай ўзгариб кетди. Совет Иттифоқида ҳозирги замон гигант қурилмалари ва мукаммаллашган аппаратлар билан жиҳозланган йирик илмий текшириш физика институтларн ташкил қилинган.

Кучли тезлатгичларнинг яратилнши элементар зарралар физикасини ривожлантиришда янги даврнн бошлаб юборди. Тезлатгичлар ёрдамида олимлар атом, ядро, нуклон табиати сирларинн ўрганмоқдалар. Совет олимларига космик нурлар, корпускуляр нурланиш, ионосферанинг тузилиши, атмосфера юқори қатламининг ионизация даражаси, Ер ва Ойнинг электр ва магнит майдонларини ўрганиш каби илмий тадқиқот ишларини олиб боришда Ернинг сунъий йўлдошларн, космик ракеталар ва космик кемалар катта ёрдам бермоқда.

Ҳозирги вақтда тажриба ва ўлчаш техникасининг узлуксиз равишда мукаммаллашиб борнши кишн онги билиш қобилиятининг чексизлигига гувоҳ бўлди. Бу эса буржуа идеалистларнинг кишн онги билиш қобилияти чекланган деб кўрсатиш учун қилган ҳаракатларига — агностнзмга зарба берди.

Илмий текшириш институтларида ишлатилаётган мураккаб физик асбоб ва қурилмалар, ҳозиргн замон физика назариялари, тушунча ва тасаввурларн, физик-идеалистлар кўрсатмоқчи бўлганидек, мантиқий фикр юритиш натижасигина эмаслигига гувоҳ бўлмоқда. Янги асбоблар бизга «кўринмайдиган» табиат ҳодиса ва процессларини ўрганишга имкон беради.

Шундай қилиб материя тузилиши ҳақидаги билимларимизнинг ортиши ва саноат, техниканинг ривожланиши бир-бирига чамбарчас боғлиқдир. Материя сирларинн ўрганиш, атом ва ядро тузилишини билиш техника ва саноатда ҳақиқий революция ясади.

Техника ва саноатнинг ривожланиши эса, ўз навбатида, микродунёни ўрганишнинг чекланмаган имконини яратиб беради.

Ҳозирги замон табиатшунослиги кашфиётлари XIX аср кашфиётлари билан биргаликда марксча-ленинча фалсафанинг бундан кейинги ривожланиши учун илмий асос бўлади.

МУНДАРИЖА

Сўз боши

I боб. Атом физикаси

1-§. Атом ва унинг энергияси тарихидан 5
2-§. Модда тузилиши 8
3-§. Атом спектрларидаги қонуниятлар 10
4-§. Атомнинг энергияси сатҳлари 12
5-§. Бор назарияси 16
6-§. Водород атомининг спектри 18
7-§. Квант сонлар 20
8-§. Электрон конфигурациялар 24
9-§. Электрон қобиқларининг тузилиши 27
10-§. Кўп электронли атомларнинг спектрлари 33

II боб. Ядро ичида

11-§. Квант механикаси 36
12-§. Фотон тўлқинми ёки заррами? 39
13-§. Атомнинг ядро тузилиши 42
14-§. Ядро заряди, массаси ва изотоплар 45
15-§. Энг енгил ядролар 47
16-§. Ядро тузилиши назарияси 49
17-§. Ядро кучларининг тавсифи 51
18-§. Ядро кучлари ва мезонлар 53
19-§. Сунъий атом 58
20-§. Нуклонларнинг шакли 61

III боб. Радиоактивлик

21-§. Радиоактивлик ҳодисасининг кашф этилиши ва умумий хоссалари 65
22-§. Радиоактив оилалар 73
23-§. Ядроннинг барқарорлиги 76
24-§. Ядронинг боғланиш энергияси 78
25-§. Альфа-емирилиш назарияси 83
26-§. Бета-емирилиш назарияси 86
27-§. Бета-емирилиш спектрининг шакли ва нейтрино ҳақидаги гипотеза 89
28-§. Ички конверсия. Ядро изомерияси 95

IV боб. Элементлар даврий системасининг тўлдирилиши ва трансуран элементлар

29-§. Менделеев жадвалида етишмайдиган элементлар 98
30-§. Трансуран элементлар 101
31-§. Энг оғир элементлар 106

V боб. Ҳозирги замон тезлатгичлари

32-§. Тезлатгичларнинг хизмати . . . . . .
33-§. Тезлатгичлар тўғрисида умумий маълумотлар . . . . . .
34-§. Ионларнинг орбитал турғунлиги . . . . . .
35-§. Ионларнинг фазавий турғунлиги . . . . . .
36-§. Чизиқли резонанс тезлатгичлар . . . . . .
37-§. Ван-де-Грааф тезлатгичи . . . . . .
38-§. Циклотрон . . . . . .
39-§. Бетатрон . . . . . .
40-§. Кучли фокуслашга асосланган тезлатгичлар . . . . . .
41-§. Азимут бўйича ўзгарувчан магнит майдонли циклотрон . . .
42-§. Фазотрон . . . . . .
43-§. Синхротрон . . . . . .
44-§. Синхрофазотрон . . . . . .

VI боб. «Митти» зарралар оламида

45-§. Элементар зарралар тавсифи . . . . . .
46-§. Антидунёга очилган дарча . . . . . .
47-§. «Унг» ва «чап» ннинг тенг ҳуқуқли эмаслиги . . . . . .
48-§. Ўн икки зарра . . . . . .
49-§. Мюон электронми? . . . . . .
50-§. Элементар зарраларнинг ўзаро таъсирлашуви ва ундаги сақланиш қонунлари . . . . . .

VII боб. Ионлаштирувчи нурланишни ўрганиш усуллари

51-§. Нурланишнинг модда орқали ўтиши . . . . . .
52-§. Ионлаштирувчи нурланишни ўрганиш . . . . . .
53-§. Зарралар энергиясини, зарядини ва массасини аниқлаш . . .

Совет физикларининг ҳозирги замон фани ривожига қўшган ҳиссалари . . . . . .

118
119
128
133
135
139
141
143
145
148
150
152
153
155
158
162
170
172
173
179
182
196
211

На узбекском языке

РАХИМ БЕГЖАНОВИЧ БЕГЖАНОВ

АТОМЫ, ЯДРА И ЧАСТИЦЫ

Пособие для учителей и учащихся средней школы

Издательство «Ўқитувчи»
Ташкент — 1972

А. Н. ТИХОНОВ
Д. П. КОСТОМАРОВ

ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ





519
Т46

А. Н. ТИХОНОВ
Д. П. КОСТОМАРОВ

ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика»



Вух. фак. и ЛП
Библиотека
№ 4/5450

МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1984

22.19
Т 46
УДК 519.6

Вводные лекции по прикладной математике. Тихонов А. Н., Костомаров Д. П. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 192 с.

Книга является учебным пособием по курсу «Введение в специальность» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Прикладная математика». Изложенный в ней материал дает общее представление об идеях и методах современной прикладной математики, об ее программных и технических средствах, знакомит с проблемами и трудностями исследований, связанных с применением математических методов на базе ЭВМ к решению задач народного хозяйства.

Рецензенты:
кафедра прикладной математики Московского института электронного машиностроения;
доктор физико-математических наук *Л. Д. Кудрявцев*

Т $\frac{1702070000-130}{053\,(02)-84}$ 165—84

© Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1984

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5

Введение. **Научно-технический прогресс и математика** . . 7
Глава 1. **Математические модели** 11
§ 1. Пусть дано 11
§ 2. Соответствие математической модели изучаемому объекту. Критерий практики 14
§ 3. Развитие и уточнение математической модели . . . 18

Глава 2. **Вычислительные алгоритмы** 26
§ 1. Понятие алгоритма 26
§ 2. Уравнения. Теорема о существовании корня непрерывной функции 34
§ 3. Метод вилки 39
§ 4. Метод итераций (метод последовательных приближений) 43
§ 5. Метод касательных (метод Ньютона) 48
§ 6. Заключительные замечания 53

Глава 3. **Электронно-вычислительные машины** 55
§ 1. От 10 пальцев к ЭВМ 55
§ 2. Как работают ЭВМ 57
§ 3. Поколения ЭВМ 66
§ 4. Мини- и микрокомпьютеры 82

Глава 4. **Программирование. Математическое обеспечение ЭВМ** 88
§ 1. Прикладное и системное программирование 88
§ 2. Языки программирования. Трансляторы 90
§ 3. Стандартные подпрограммы. Библиотеки. Пакеты прикладных программ 99
§ 4. Операционные системы 104

Глава 5. **Системы линейных алгебраических уравнений** . . 112
§ 1. Формулы Крамера 113
§ 2. Метод Гаусса 114
§ 3. Уменьшение ошибок округления 118
§ 4. Итерационные методы 120
§ 5. Обусловленность матриц 124
§ 6. Нормальные решения приближенных систем линейных алгебраических уравнений 128

Глава 6. **Задачи оптимизации** 133
§ 1. Задача о наилучшей консервной банке 134

§ 2. Одномерные задачи оптимизации 136
§ 3. Численное решение одномерных задач оптимизации 139
§ 4. Многомерные задачи оптимизации 145
§ 5. Линейное программирование 154

Глава 7. **Определенный интеграл. Численное интегрирование** 164
§ 1. Как подсчитать путь при неравномерном движении или работу переменной силы 164
§ 2. Понятие определенного интеграла 168
§ 3. Формула Ньютона—Лейбница 169
§ 4. Алгоритмы численного интегрирования 171
§ 5. Построение первообразной с помощью численного интегрирования 179

Заключение 183

Предметный указатель 187

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание в середине XX в. электронно-вычислительных машин (ЭВМ) можно сравнить по своей значимости с любым из самых выдающихся технических достижений в истории человечества. В то же время необходимо подчеркнуть их особую, специфическую роль. Если обычные машины расширяют физические возможности людей в процессе трудовой деятельности, то ЭВМ являются их интеллектуальными помощниками. Широкое применение математических методов на базе ЭВМ привело к появлению новых эффективных методов познания законов реального мира и их использованию в практической деятельности. Вычислительные машины открыли новые возможности увеличения производительности труда, дальнейшего развития производства, совершенствования управления.

Процесс математизации науки, техники, экономики потребовал подготовки высококвалифицированных специалистов, в совершенстве владеющих технологией применения ЭВМ, способных реализовать их огромные и пока еще далеко не исчерпанные возможности. ЭВМ не работают без направляющего воздействия человека. Их использование связано с построением математических моделей и созданием вычислительных алгоритмов. Машины также должны пройти соответствующее «обучение», т. е. получить программное обеспечение как общего, так и проблемно-ориентированного характера. Весь этот широкий комплекс проблем является полем деятельности специалистов по прикладной математике, для подготовки которых в семидесятые годы во многих университетах и институтах страны были созданы новые факультеты, отделения, кафедры.

Настоящая книга представляет собой учебное пособие по курсу «Введение в специальность» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Прикладная математика». Согласно действующему учебному плану такой курс читается в начале обучения. Он призван

дать студентам общее представление о прикладной математике, о проблемах и трудностях исследований, связанных с применением математических методов и вычислительной техники в народном хозяйстве, показать содержание творческой деятельности математика — прикладника.

Книга состоит из семи глав. Начинается она с четырех глав, посвященных четырем основным элементам современной прикладной математики: математическим моделям, вычислительным алгоритмам, электронно-вычислительным машинам, программированию и математическому обеспечению ЭВМ. Этот материал вводит читателя в круг идей и методов прикладной математики, знакомит с ее программными и техническими средствами. Три последние главы носят более специальный характер. Они посвящены системам линейных алгебраических уравнений, задачам оптимизации и численному интегрированию. Основное внимание в этих главах сосредоточено на алгоритмических и вычислительных вопросах. Цель этих глав — подготовить читателя к изучению численных методов и к работе в вычислительном практикуме.

Книга, как и курс, которому она соответствует, носит вводный характер. Многие вопросы в ней ставятся и обсуждаются на простейших примерах. Предполагается, что в дальнейшем, в соответствии с учебным планом специальности, они будут изучены более подробно в общих и специальных курсах.

Огромную помощь в работе над книгой нам оказали наши коллеги: В. Г. Баула, Н. П. Брусенцов, Н. Н. Ефимов, Х. Д. Икрамов, В. Г. Карманов, Л. Н. Королев, М. Г. Мальковский, В. Н. Пильщиков, Р. Л. Смелянский, Е. В. Шикин. Всем им авторы выражают свою самую искреннюю благодарность.

Академик А. Н. Тихонов
Профессор Д. П. Костомаров

Факультет вычислительной математики
и кибернетики МГУ

ВВЕДЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И МАТЕМАТИКА

Одной из характерных особенностей нашего времени является широкое применение математических методов и ЭВМ в самых различных областях человеческой деятельности. «Диагноз ставит ЭВМ», «Соавтор конструктора» — такие заголовки нередко встречаются сегодня в газетах. Бурный процесс математизации науки, техники и всего народного хозяйства в целом начался в 50-х годах после появления и быстрого совершенствования ЭВМ. Он привел к формированию современной прикладной математики, которая включает в себя широкий круг вопросов, связанных с применением математических методов на базе ЭВМ к решению задач народного хозяйства.

Математика — одна из самых древних наук. Она зародилась на заре человеческой цивилизации из потребностей практики. Строительство, измерение площадей земельных участков, навигация, торговые расчеты, управление государством требовали умения производить арифметические вычисления и определенных геометрических представлений. В дальнейшем математика сформировалась в стройную логическую систему, как составная часть общего комплекса научных знаний. Потребности естествознания, техники, всей практической деятельности людей постоянно ставили перед математикой новые задачи и стимулировали ее развитие. В свою очередь прогресс в математике делал математические методы более эффективными, расширял сферу их применения и, тем самым, способствовал общему научно-техническому прогрессу.

Роль математики в различных областях человеческой деятельности и в разное время была различной. Она складывалась исторически, и существенное влияние на нее оказывали два фактора: уровень развития математического аппарата и степень зрелости знаний об изучаемом объекте,

возможность описать его наиболее существенные черты и свойства на языке математических понятий и уравнений или, как теперь принято говорить, возможность построить математическую модель изучаемого объекта.

Математическая модель, основанная на некотором упрощении, идеализации, не тождественна объекту, а является его приближенным описанием. Однако благодаря замене реального объекта соответствующей ему моделью появляется возможность сформулировать задачу его изучения как математическую и воспользоваться для анализа универсальным математическим аппаратом, который не зависит от конкретной природы объекта. Математика позволяет единообразно описать широкий круг фактов и наблюдений, провести их детальный количественный анализ, предсказать, как поведет себя объект в различных условиях, т. е. спрогнозировать результаты будущих наблюдений. А ведь прогнозирование — всегда трудная задача, и оправдывающиеся прогнозы являются предметом особой гордости любой науки.

Сложность построения и исследования математической модели существенно зависит от сложности изучаемого объекта. Математические методы давно и весьма успешно применяются в механике, физике, астрономии, т. е. в науках, в которых изучаются наиболее простые формы движения материи. Математика стала языком этих наук, относящихся к разряду «точных». Значительную роль играет также математика в технике. Этим вплоть до недавнего времени исчерпывалась сфера широкого применения математических методов. Ситуация резко изменилась с появлением ЭВМ. Причина этого заключается в следующем. В математике часто встречаются задачи, решение которых не удается получить в виде формулы, связывающей искомые величины с заданными. Про такие задачи говорят, что они не решаются в явном виде. Для их решения стремятся найти какой-нибудь бесконечный процесс, сходящийся к искомому ответу. Если такой процесс указан, то, выполняя некоторое число шагов и затем обрывая вычисления (их нельзя продолжать бесконечно), мы получим приближенное решение задачи. Эта процедура связана с проведением вычислений по строго определенной системе правил, которая задается характером процесса и называется *алгоритмом*.

Такой подход к решению математических задач был известен еще до появления ЭВМ, но применялся весьма редко из-за исключительной трудоемкости больших вычислений.

Открытие У. Леверье за письменным столом «на кончике пера» планеты Нептун (он рассчитал ее траекторию по возмущениям траектории планеты Уран) было научным подвигом, навсегда вошедшим в историю науки. Однако в большинстве случаев исследователи стремились избегать больших вычислений. Поэтому сложные математические модели, для которых не удавалось получить ответ в виде формул, либо вообще не рассматривались, либо упрощались с помощью дополнительных предположений. Упрощение модели снижало степень ее соответствия изучаемому объекту, делало результаты исследования объекта менее точными и, следовательно, менее интересными, а иногда и приводило к ошибкам.

Опытный вычислитель тратил на выполнение одного арифметического действия в среднем за рабочую смену около полминуты. Современные ЭВМ выполняют миллионы операций в секунду. Таким образом, за короткий промежуток времени, порядка 40 лет, благодаря ЭВМ скорость проведения вычислений возросла примерно в 100 млн. раз. Такого скачка не было за всю историю человечества ни в одной сфере человеческой деятельности.

Применение численных методов на базе ЭВМ сразу существенно расширило класс математических задач, допускающих исчерпывающий анализ. Теперь уже исследователю при построении математической модели какого-то объекта не нужно стремиться к сильным упрощениям, которые были необходимы раньше для получения ответа в явном виде. Его внимание, прежде всего, должно быть направлено на то, чтобы правильно учесть все наиболее существенные особенности изучаемого объекта и отразить их в математической модели. После того как модель построена, встает вопрос о разработке алгоритма решения соответствующей математической задачи и о его реализации на ЭВМ. Таким образом, ЭВМ изменили подход к применению математики как метода исследования. Они вызвали переориентацию многих сложившихся направлений математики и развитие ряда новых.

Сегодня ЭВМ являются одним из определяющих факторов научно-технического прогресса. Их применение способствует ускорению развития ведущих отраслей народного хозяйства, открывает принципиально новые возможности проектирования сложных систем при значительном сокращении сроков их разработки и внедрения в производство, обеспечивает выбор оптимальных режимов производствен-

но-технологических процессов, создает условия для совершенствования управления и повышения производительности труда. Если обычно машины брали на себя физические функции человека в процессе производства, то ЭВМ расширили его интеллектуальные возможности в умственной деятельности. Они являются одним из важных факторов превращения науки в непосредственную производительную силу нашего общества. Без ЭВМ не могли бы развиваться многие крупные научно-технические проекты (космические исследования, атомная энергетика, сверхзвуковая авиация и т. д.).

Благодаря ЭВМ идет интенсивный процесс математизации не только естественных и технических, но также и общественных наук; важное значение приобрело применение математических методов в экономике. Математическое моделирование начинает широко использоваться в химии, геологии, биологии, медицине, психологии, лингвистике. Большое внимание уделяется подготовке высококвалифицированных кадров, способных реализовать те огромные возможности, которые открывает эффективное использование ЭВМ. Во многих университетах и институтах созданы факультеты прикладной или вычислительной математики. Подтверждается точка зрения К. Маркса, который, по свидетельству П. Лафарга, считал, что «наука только тогда достигает совершенства, когда ей удается пользоваться математикой».

ГЛАВА 1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

§ 1. Пусть дано...

Такими словами явно или неявно обычно начинаются формулировки теорем и условий математических задач. Затем на языке строго определенных математических понятий следует полное изложение исходных предпосылок, которое воспринимается одинаково любым математиком, являющимся специалистом в соответствующей области.

Иначе обстоит дело с прикладными задачами. В них непосредственно задается реальный «нематематический» объект: явление природы, производственный процесс, конструкция, система управления, экономический план и т. д. Исследование начинается с формализации объекта, с построения соответствующей *математической модели*: выделяются его наиболее существенные черты и свойства и описываются с помощью математических соотношений. Только после того, как построена математическая модель, т. е. задаче придана математическая форма, мы можем воспользоваться для ее изучения математическими методами.

Вы знакомы с математическими моделями, хотя, может быть, раньше и не встречали этого термина. Представьте себе, что нужно определить площадь поверхности письменного стола. Для этого измеряют его длину и ширину, а затем перемножают полученные числа. Такая элементарная процедура фактически означает следующее. Реальный объект — поверхность стола — заменяется абстрактной математической моделью — прямоугольником. Прямоугольнику приписываются размеры, полученные в результате измерения, и площадь такого прямоугольника приближенно принимается за искомую площадь.

Выбор для поверхности письменного стола модели прямоугольника мы обычно делаем, полагаясь на свое зрительное восприятие. Однако человеческий глаз как измеритель-

ный инструмент не отличается высокой точностью. Поэтому при более серьезном подходе к задаче, прежде чем воспользоваться для определения площади моделью прямоугольника, эту модель нужно проверить. Проверку можно осуществить следующим образом: измерить длины противоположных сторон стола, а также длины его диагоналей, и сравнить результаты измерения между собой. Если с требуемой степенью точности длины противоположных сторон и длины диагоналей попарно равны, то поверхность стола действительно можно рассматривать как прямоугольник. В противном случае модель прямоугольника придется отвергнуть и заменить моделью четырехугольника общего вида. При более высоком требовании точности может возникнуть необходимость пойти в уточнении модели еще дальше, например, учесть закругления углов стола.

Мы так подробно обсуждаем этот простой пример, чтобы с самого начала подчеркнуть важную мысль: математическая модель не определяется однозначно исследуемым объектом. Для одного и того же стола мы можем принять либо модель прямоугольника, либо более сложную модель четырехугольника общего вида, либо еще более сложную модель «четырехугольника с закругленными углами». Выбор той или иной модели определяется требованием точности. С повышением точности модель приходится усложнять, учитывая все новые и новые особенности изучаемого объекта.

В школе с построением математических моделей вы чаще всего встречались, решая задачи по физике. В них обычно задается некоторая физическая система и описываются условия, в которых она находится. Вы должны сделать предположения о возможной идеализации этой системы (например рассматривать некоторое реальное тело как материальную точку), определить физические законы, которые нужно принять во внимание при ее изучении, и записать их в виде математических уравнений. Это и есть математическая модель рассматриваемой физической системы.

Обсудим в качестве примера следующую задачу по механике. Телу на Земле сообщили начальную скорость v_0, направленную под углом α к ее поверхности. Требуется найти траекторию движения тела и вычислить расстояние между ее начальной и конечной точками.

Чтобы сделать задачу более конкретной, предположим, что речь идет о камне, брошенном с помощью катапульты. Это уточнение определяет характерные размеры тела, его массу и возможную начальную скорость. Построим для дан-

ного случая математическую модель, основанную на следующих предположениях:

1) Земля — инерциальная система отсчета;

2) ускорение свободного падения g постоянно;

3) кривизной Земли можно пренебречь и считать ее плоской;

4) действием воздуха на движущийся камень можно пренебречь.

Введем систему координат. Ее начало совместим с катапультой, ось x направим горизонтально в сторону движения камня, ось y — вертикально вверх. При сделанных предположениях проекция камня на ось x будет двигаться равномерно со скоростью $v_x = v_0 \cos \alpha$. Движение проекции камня на ось y равноускоренное с ускорением $a_y = -g$ и начальной скоростью $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$. Таким образом, характер движения камня определяется формулами

$$x = tv_0 \cos \alpha, \tag{1}$$

$$y = tv_0 \sin \alpha - gt^2/2, \tag{2}$$

которые дают математическую модель задачи при предположениях 1)—4). Полученная модель является очень простой, и с ее помощью легко получить ответ на поставленный вопрос. Выразим из (1) время t через координату x:

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

и подставим в (2). В результате получим уравнение траектории камня:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - x \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}, \tag{3}$$

представляющей собой параболу (рис. 1). Эта парабола пересекает ось x в двух точках: $x = 0$ и $x = l$, где

$$l = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha. \tag{4}$$

Первая точка является началом траектории, в ней камень вылетает из катапульты. Вторая точка соответствует месту падения камня на землю. Формула (4) в рамках принятой модели определяет искомое расстояние l. Эта формула вам хорошо известна: она выводится и подробно обсуждается в учебнике по физике для 8-го класса.

В прикладных задачах построение математической модели — это один из наиболее сложных и ответственных эта-

нов работы. Опыт показывает, что во многих случаях правильно выбрать модель — значит решить проблему более чем наполовину. Трудность данного этапа состоит в том

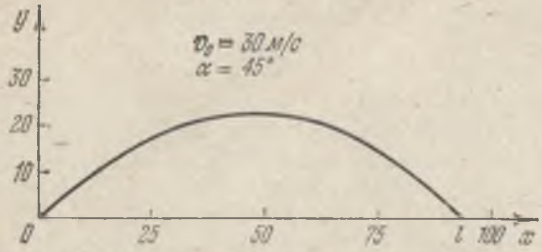


Рис. 1. Параболическая траектория движения камня.

что он требует соединения математических и специальных знаний. При решении школьных задач по физике вы выступаете одновременно как физики и математики. Однако для больших проблем, которые рассматриваются в прикладной математике, такое совмещение профессий не типично. Обычно над математической моделью совместно работают математики и специалисты из той области, к которой относится изучаемый объект. Для успеха их деятельности очень важно взаимопонимание, которое приходит тогда, когда математики обладают специальными знаниями об объекте, а их партнеры — определенной математической культурой, опытом применения математических методов исследования в своей области.

§ 2. Соответствие математической модели изучаемому объекту. Критерий практики

Математическая модель никогда не бывает тождественна рассматриваемому объекту, не передает всех его свойств и особенностей. Основанная на упрощении, идеализации, она является приближенным описанием объекта. Поэтому результаты, получаемые при анализе модели, всегда носят для объекта приближенный характер. Их точность определяется степенью соответствия, адекватности модели и объекта. Вопрос о точности, о достоверности результатов — это один из самых тонких вопросов прикладной математики.

Наиболее просто он решается в случае, когда хорошо известны законы, определяющие поведение и свойства объ-

екта, и имеется большой практический опыт их применения. Тогда можно априори (до опыта, здесь — до начала решения математической задачи) оценить точность результатов, которую обеспечивает рассматриваемая модель.

Приведем пример. В СССР 2 января 1959 г. был осуществлен запуск автоматической станции Луна-1, который открыл для человечества эру межпланетных полетов. Расчет траектории станции в межпланетном пространстве проводился на основании математической модели, использующей законы механики и закон всемирного тяготения. Многовековой опыт наблюдения за небесными телами в Солнечной системе показал, что такая модель очень точно описывает их движение. Универсальность законов природы служила гарантией применимости модели к космическому аппарату, созданному руками человека.

Более сложная ситуация возникает тогда, когда наши знания об изучаемом объекте недостаточны. В этом случае при построении математической модели приходится делать дополнительные предположения, которые носят характер *гипотез*. Выводы, полученные в результате исследования такой *гипотетической модели*, носят для изучаемого объекта условный характер. Они справедливы для него настолько, насколько правильны исходные предположения. Для их проверки необходимо сопоставить результаты исследования модели со всей имеющейся информацией об изучаемом объекте. Степень близости расчетных и экспериментальных данных позволяет судить о качестве гипотетической модели, о справедливости или ошибочности исходных предположений. Таким образом, вопрос применимости некоторой математической модели к изучению рассматриваемого объекта не является чисто математическим вопросом и не может быть решен математическими методами. Основным критерием истинности является эксперимент, практика в самом широком смысле этого слова. *Критерий практики* позволяет сравнить различные гипотетические модели и выбрать из них такую, которая является наиболее простой и в то же время в рамках требуемой точности правильно передает свойства изучаемого объекта.

Для иллюстрации этих соображений вернемся к задаче о траектории полета камня, выбрасываемого катапультой, и продолжим ее обсуждение. В § 1 мы построили математическую модель движения камня, основанную на четырех упрощающих предположениях, и получили формулу (4) для дальности броска. Теперь нам нужно оценить точность

этой формулы, установить пределы ее применимости. Для такого анализа не обязательно самому проводить прямые эксперименты с катапультой, заимствованной из музея или восстановленной по старым чертежам. По интересующим нас вопросам накоплен огромный экспериментальный и теоретический материал, так что нужно только умело воспользоваться им для анализа поставленной задачи.

Перечитайте еще раз упрощающие предположения, на основании которых была построена математическая модель движения камня, и вдумайтесь в их смысл. Пусть катапульта может метать камни на расстояние до 100 м, для чего она должна сообщить им скорость порядка 30 м/с. При этом камень поднимется на высоту 20—30 м и пробудет в воздухе около 5 с. В этих условиях первые три предположения выглядят совершенно оправданными, и нам нужно проанализировать четвертое предположение о влиянии воздуха. На всякое тело, движущееся в воздухе, он действует с некоторой силой $\boldsymbol{F}$. Ее модуль и направление зависят от формы тела и скорости движения. Силу $\boldsymbol{F}$ можно разложить на две составляющие: параллельную и перпендикулярную скорости движения тела $\boldsymbol{v}$.

Перпендикулярная составляющая возникает только при наличии асимметрии тела по отношению к направлению движения. Наиболее характерным ее проявлением является подъемная сила, действующая на крыло самолета, без которой была бы невозможна авиация. Для того чтобы эта сила могла оторвать самолет от земли и поддерживать его в воздухе, крылу придают специальную форму и располагают его под определенным углом атаки к набегающему воздушному потоку. Однако для камня, форма которого близка к сферической, перпендикулярная составляющая силы $\boldsymbol{F}$ мала, и ею можно пренебречь (для шара благодаря его симметрии она точно равна нулю).

Параллельная составляющая силы $\boldsymbol{F}$ возникает всегда. Она направлена в сторону, противоположную движению, и стремится затормозить тело; ее называют *лобовым сопротивлением*. Таким образом, в интересующем нас случае

$$F \approx F_{л}. \tag{5}$$

Модуль лобового сопротивления $\boldsymbol{F}_{л}$ можно представить в виде

$$F_{л} = CS\frac{\rho v^2}{2}, \tag{6}$$

где S — площадь поперечного сечения тела, ρ — плотность воздуха, v — скорость движения тела, C — безразмерный множитель, который называют *коэффициентом лобового сопротивления*.

Коэффициент лобового сопротивления зависит от формы тела и характеристики процесса обтекания, которую называют *числом Рейнольдса*:

$$C = C(\mathrm{Re}), \qquad \mathrm{Re} = \frac{v\rho d}{\mu}. \tag{7}$$

Здесь d — характерный размер тела, ρ и μ — плотность и вязкость воздуха ($\rho = 1{,}3$ кг/м^3, $\mu = 1{,}7 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с)). Из размерностей величин, входящих в (7), видно, что число Рейнольдса — безразмерная величина.

Оценим величину числа Рейнольдса в интересующем нас случае, когда $v = 30$ м/с, $d = 0{,}2$ м $= 20$ см:

$$\mathrm{Re} = \frac{30 \cdot 0{,}2 \cdot 1{,}3}{1{,}7 \cdot 10^{-5}} = 4{,}6 \cdot 10^5. \tag{8}$$

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что для шара, в широком диапазоне чисел Рейнольдса, включающих значение (8):

$$3 \cdot 10^5 \leqslant \mathrm{Re} \leqslant 7 \cdot 10^6, \tag{9}$$

коэффициент лобового сопротивления C очень слабо зависит от своего аргумента Re, и его можно считать постоянным:

$$C \approx 0{,}15. \tag{10}$$

Полагая в (6) $S = \pi R^2$ и принимая во внимание (10), получим простую формулу для модуля лобового сопротивления шара при условии (9):

$$F_л = \frac{C\pi}{2} R^2 \rho v^2. \tag{11}$$

Эта формула, в частности, указывает на квадратичную зависимость $F_л$ от скорости.

Для того чтобы оценить влияние сопротивления воздуха на характер движения, сравним его с основной силой в рассматриваемой задаче — с силой тяжести:

$$P = mg = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_0 g,$$

где ρ_0 — плотность камня ($\rho_0 = 2{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3). Заменим в

Бух. ГИП и ЛП
БИБЛИОТЕКА
№ 4/5450

формуле (6) v^2 на lg и составим отношение $F_л/P$:

$$\frac{F_л}{P} = \frac{C\pi R^2 \rho\, lg/2}{4\pi R^3 \rho_0 g/3} = \frac{3C}{8} \cdot \frac{\rho l}{\rho_0 R}. \qquad (12)$$

При $l=100$ м, $R=0{,}1$ м, считая $C\approx 0{,}15$, получаем $F_л/P = 0{,}03$.

Обозначим через Δl абсолютную погрешность, которую мы допускаем в определении дальности броска l, пренебрегая сопротивлением воздуха. При малом сопротивлении воздуха ($F_л/P \ll 1$) относительная погрешность $\Delta l/l$ пропорциональна $F_л/P$ с коэффициентом пропорциональности порядка единицы. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне параметров получаем $\Delta l/l \sim 2$—3% и $\Delta l \sim 2$—3м. Если не требуется высокая точность и такая ошибка допустима, то применение модели оправдано. В противном случае ее следует заменить более сложной моделью, учитывающей сопротивление воздуха.

В заключение подчеркнем, то наша оценка рассмотренной математической модели не является абсолютной: модель годится или не годится. Проведенный анализ дал возможность установить для нее условия применимости, связав их с диапазоном изменения параметров задачи и требуемой точностью. Он также позволил наметить путь уточнения модели в случае, когда условия ее применимости перестают выполняться.

§ 3. Развитие и уточнение математической модели

Исследование прикладных задач обычно начинается с построения и анализа простейшей, наиболее грубой математической модели рассматриваемого объекта. (Характерным примером может служить модель параболической траектории полета тела, получившего на поверхности Земли начальную скорость v_0.) Однако в дальнейшем часто возникает необходимость уточнить модель, сделать ее соответствие объекту более полным. Это может быть обусловлено разными причинами: требованием более высокой точности, появлением новой информации об объекте, которую нужно отразить в математической модели, расширением диапазона параметров, выводящим за пределы применимости исходной модели, и т. д. При построении новой модели полезно максимально полно использовать опыт и результаты, полученные на первом этапе. Часто процесс последовательного развития и уточнения модели повторяется неоднократно.

Для иллюстрации этих соображений вернемся снова к задаче о движении тела, брошенного с поверхности Земли, и рассмотрим ее применительно к *внешней баллистике*. Так называют науку о движении снаряда, вылетевшего из ствола орудия. Мы выбрали баллистику не только потому, что ее задачи интересны с математической и важны с практической точек зрения. Не менее существенна другая сторона вопроса: на этом примере мы сможем наглядно показать процесс постепенного совершенствования и уточнения математической модели рассматриваемого явления, который исторически продолжался более 300 лет.

Древние воины, использовавшие катапульты для разрушения неприятельских укреплений, не знали законов механики и не могли теоретически рассчитать траекторию полета камня даже в рамках очень простой модели. Впрочем, это и не было нужно. Положение изменилось с изобретением пороха и появлением артиллерии, существенно увеличившей дальность, интенсивность и эффективность обстрела.

Исследования по внешней баллистике были начаты в XVII в. Г. Галилеем, который разработал теорию параболического движения снаряда, рассмотренную в § 1. Следующий шаг связан с именем И. Ньютона. В своем основном труде «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) он предпринял попытку решить задачу баллистики с учетом сопротивления воздуха. Этот шаг был совершенно необходим: из результатов § 2 ясно, что, несмотря на несовершенство орудий XVII в., воздух должен был оказывать заметное влияние на движение ядер, вызывая отклонение их траектории от параболы (3). Действительно, проведем с помощью (12) оценку роли сопротивления воздуха для чугунного ядра, полагая $l=1$ км$=10^3$ м, $R=0{,}07$ м, $\rho_0=7\cdot 10^3$ кг/м^3 (плотность чугуна), $C=0{,}15$. При указанных значениях параметров $F_л/P=0{,}15$, т. е. пренебрежение сопротивлением воздуха приводит к ошибке в определении дальности l порядка 15% ($\sim$150 м).

Рассмотрим математическую модель баллистики пушечного ядра, учитывающую сопротивление воздуха. При ее построении мы по-прежнему будем считать справедливыми первые три предположения предыдущей модели, а четвертое предположение переформулируем следующим образом:

4) воздух действует на ядро при его движении с силой $\boldsymbol{F}_л$, ее модуль определяется формулой (11), а направление противоположно направлению скорости.

же точку: из-за действия случайных факторов снаряды рассеиваются. Это означает, что любое предсказание баллистического расчета носит не строго определенный, детерминированный характер, а является вероятностным. В конце XIX — начале XX в. в математических моделях баллистики начали использовать методы теории вероятности.

Сложность задач баллистики делает невозможным их решение непосредственно на поле боя. В помощь артиллеристам стали создаваться специальные таблицы, получившие название «таблиц стрельбы». В них для определенного типа орудий и снарядов (т. е. для заданной начальной скорости v_0) приводились основные характеристики траекторий при разных углах возвышения α: дальность l, максимальная высота h, время полета снаряда T. Такие таблицы были уже широко распространены к началу первой мировой войны.

Дальнейшее увеличение скорости снарядов и дальности стрельбы привело к необходимости внести в математическую модель баллистики еще одно уточнение — учет вращения Земли вокруг своей оси. Тем самым пришлось отказаться от предположения, что Земля — инерциальная система отсчета. Анализ показывает, что из-за вращения Земли всякое тело должно отклоняться от направления своего движения в Северном полушарии немного вправо, в Южном — влево. С этим эффектом связаны, в частности, два хорошо известных явления: у наших рек правый берег обычно подмывается сильнее левого, а на двухколейных железных дорогах быстрее снашивается правый рельс по ходу движения поезда.

Мы не будем останавливаться на деталях математического описания данного эффекта и его включения в общую модель баллистики снаряда. Приведем только один поучительный эпизод из истории первой мировой войны.

В 1914 г. около Фолклендских островов, которые расположены в Атлантическом океане вблизи побережья Южной Америки (51° S, 60° W), произошел морской бой между английской и немецкой эскадрами, закончившийся победой англичан. Однако в начале боя залпы английских кораблей систематически ложились метров на 100 левее цели и потребовалась специальная корректировка в установках прицела, чтобы устранить отклонение. Произошло это по следующей причине. Прицельные приспособления на английских кораблях автоматически вносили поправку на вращение Земли. Однако она была рассчитана на средние широты северного полушария (50° N), бой же произошел на той же

широте Южного полушария, где отклонение снарядов из-за вращения Земли должно иметь противоположный знак. В результате коррекция, вносимая прицельным устройством, не компенсировала смещение, а удваивала его, и сдвиг достиг величины порядка 100 м.

Заканчивая знакомство с математическими задачами баллистики, остановимся еще на одном событии первой мировой войны. В ходе войны немцы сумели подойти к Парижу на расстояние меньше 100 км, но у них не хватило сил овладеть столицей Франции. Тогда командование германской армии приняло решение подвергнуть Париж артиллерийскому обстрелу. Для этой цели специально были изготовлены сверхдальнобойные орудия «Колоссаль». Они представляли собой огромные установки (длина ствола — 34 м, калибр — 210 мм), которые монтировались на специальной платформе и имели дальность стрельбы свыше 100 км. Снаряд посылался под фиксированным углом возвышения $\alpha = 52{,}5^\circ$, круто уходил вверх и основную часть пути летел на высоте, превышающей 20 км, практически не испытывая сопротивления воздуха. Дальность стрельбы регулировалась размером порохового заряда, масса которого доходила до 200 кг. Ствол из-за своей огромной длины легко деформировался и выдерживал небольшое число выстрелов.

Стрельба на такие большие расстояния потребовала сложных баллистических расчетов на основе усовершенствованной математической модели. В ней учитывались зависимость плотности воздуха и ускорения свободного падения от высоты, топогеодезические данные о местности, включающие кривизну земной поверхности (Земля в задачах баллистики перестала быть «плоской»), метеорологические данные о скорости и направлении ветра, давлении воздуха и т. д. Несмотря на тщательную подготовку каждого выстрела, наблюдалось большое рассеивание снарядов: из 303 снарядов, выпущенных за время войны по Парижу, 120 упало за его пределами. Существенного влияния на ход первой мировой войны обстрел Парижа не оказал.

Подведем итоги обсуждения математических моделей задач баллистики. Оно началось с простейшей модели Галилея, которая основана на предположениях, сильно упрощающих задачу. Такая модель справедлива в очень узком диапазоне начальных скоростей: $v_0 \leqslant 30$ м/с.

Затем была рассмотрена модель, учитывающая сопротивление воздуха. При этом предполагалось, что коэффициент, лобового сопротивления в формуле (6) является по-

Учет сопротивления воздуха существенно усложняет задачу. Теперь уже она не допускает решения в виде простых аналитических формул и может быть решена только с помощью численных методов. На рис. 2, 3 в качестве примера приведены результаты расчетов двух траекторий.

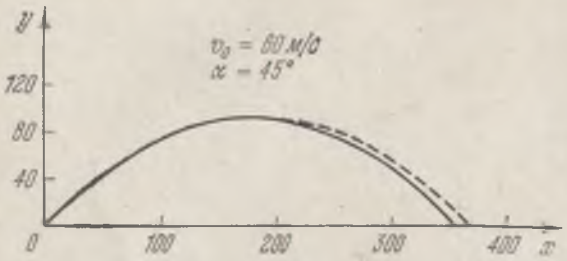


Рис. 2. Влияние сопротивления воздуха на движение пушечного ядра, вылетающего с начальной скоростью 60 м/с. Сплошная линия — траектория, рассчитанная с учетом сопротивления воздуха, штриховая — без учета.

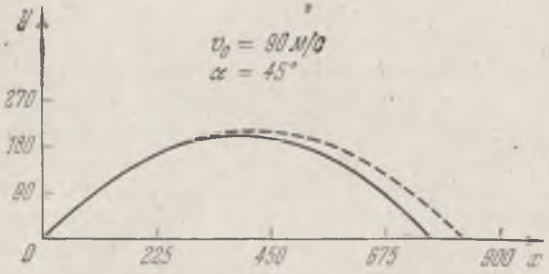


Рис. 3. Влияние сопротивления воздуха на движение пушечного ядра, вылетающего с начальной скоростью 90 м/с. Сплошная линия — траектория, рассчитанная с учетом сопротивления воздуха, штриховая — без учета.

В обоих случаях предполагалось, что чугунное ядро радиуса $R=0{,}07$ м вылетает под углом $\alpha=45°$ к поверхности Земли. Начальная скорость v_0 на рис. 2 принималась равной 60 м/с, на рис. 3—90 м/с. Штриховыми линиями даны параболические траектории (3) в модели § 1. Сравнение сплошных и штриховых линий наглядно показывает влияние сопротивления воздуха на движение ядра при различных начальных скоростях.

Переход в XIX в. от гладкоствольного к нарезному оружию позволил существенно увеличить дальность и точность стрельбы. Появилась возможность вести огонь с закрытых

позиций с помощью приборов, не видя непосредственно цели. Это потребовало совершенствования прицельных приспособлений, поставило новые задачи перед баллистикой и привело к дальнейшему уточнению используемых математических моделей.

Наиболее характерной особенностью баллистики снарядов нарезного оружия является сверхзвуковая скорость их движения. При таких скоростях около снаряда образуется волна сильного сжатия, которая расходится от него в виде конуса (так называемого *конуса Маха*) с углом раствора $\varphi = \arcsin(c/v)$, где v — скорость снаряда, c — скорость звука (при нормальных условиях $t = 15°C$, $p = 760$ мм рт. ст., $c = 340$ м/с). Эта волна хорошо видна на рис. 4, где приведено изображение снаряда, движущегося со скоростью $v = 2{,}48\ c$.

Лобовое сопротивление при сверхзвуковом движении является, в первую очередь, волновым. Оно связано с тем, что снаряд должен непрерывно расходовать свою кинетическую энергию на образование волны. Для его уменьшения снаряду придают специальную форму вытянутого тела вращения с заостренным носом (см. рис. 4). Модуль лобового сопротивления, как и в предыдущем случае, удобно представить в виде (6). Однако для сверхзвуковых скоростей ($v > c$) коэффициент C не будет постоянным. Он оказывается функцией скорости $C = C(v)$, резко возрастающей при увеличении скорости. Это сильно усложняет задачу расчета траектории снаряда.

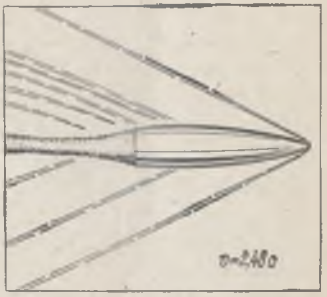


Рис. 4. Волна сжатия вокруг снаряда, движущегося со сверхзвуковой скоростью.

До сих пор мы предполагали, что все величины, которые входят в условия задачи баллистики, известны точно. На самом деле это не так. Снаряды нельзя изготовить абсолютно одинаковыми: они немного отличаются друг от друга по весу, по величине порохового заряда и при выстреле получают разные начальные скорости. Невозможно дважды выстрелить под одним и тем же углом возвышения α. Эти и целый ряд других неконтролируемых факторов приводят к тому, что два снаряда, выпущенные из орудия при одинаковых, на наш взгляд, условиях, никогда не попадут в одну и ту

стоянным ($C \approx 0{,}15$). Эта модель справедлива в диапазоне дозвуковых скоростей: $v_0 \leqslant 250$—300 м/с.

Следующая модель позволила перейти к сверхзвуковым скоростям. Однако для ее реализации необходимо знать зависимость коэффициента лобового сопротивления рассматриваемого тела от скорости.

Далее в модель были также включены эффект вращения Земли, учет сферической формы ее поверхности и зависимости g от высоты, метеорологических данных, случайных факторов, которые приводят к рассеянию снарядов и придают изучаемым закономерностям статистический характер. В результате была построена модель баллистики, применимая во всем диапазоне скоростей, которые были достигнуты с помощью огнестрельного оружия. Подчеркнем, что в ней оказались пересмотренными все исходные упрощающие предположения модели Галилея.

Каждая модель, применявшаяся в баллистике, проходила проверку практикой. С появлением нарезного оружия, существенно увеличившего дальность и точность стрельбы, начали играть важную роль полигонные испытания. На них проверялись и оружие, и баллистические расчеты.

В 50-х годах с появлением ракет различного назначения возникли задачи ракетной баллистики. Запуск 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли и выход 2 января 1959 г. станции Луна-1 в межпланетное пространство потребовали разработки специфических проблем космической баллистики.

На рис. 5 в качестве примера приведена траектория советской автоматической межпланетной станции Луна-2, которая позволила заглянуть в неизвестное: сделать первые снимки обратной стороны Луны и передать их на Землю. Станция была запущена 4 октября 1959 г. Она имела только микродвигатели, предназначенные для ее ориентации и наведения фотообъективов на Луну. Коррекция траектории не проводилась. Осуществление такого уникального для своего времени космического полета потребовало высочайшей точности вывода станции на орбиту.

Дальнейший прогресс в космических исследованиях был основан на применении автоматических и пилотируемых аппаратов, снабженных собственными бортовыми двигателями. Благодаря им космические аппараты, выведенные на орбиту ракетой-носителем, перестали быть пассивными «пленниками» гравитационных сил: появилась возможность целенаправленного изменения их траекторий.

Всякое управляемое изменение траектории принято называть в космической баллистике *маневром*. Примерами маневров могут служить переход с одной орбиты искусственного спутника Земли на другую, стыковка, возвращение

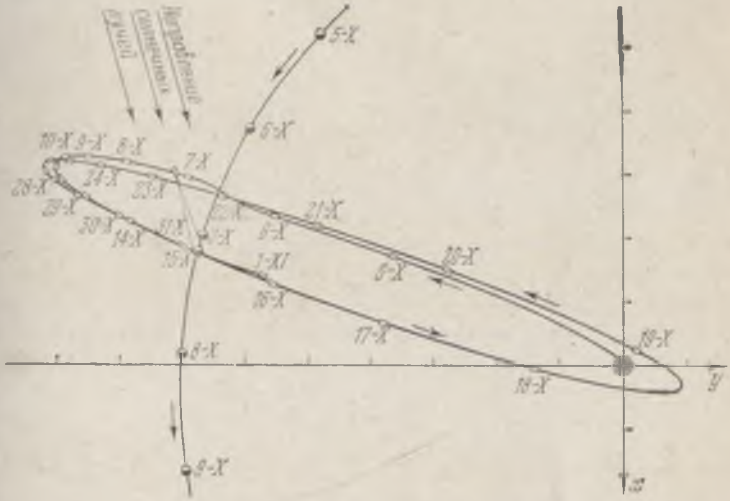


Рис. 5. Траектория советской автоматической межпланетной станции Луна-2 (проекция на плоскость орбиты Луны).

аппарата с орбиты на Землю, коррекция траектории при полете к другим планетам, изменение траектории при подлете к какой-нибудь планете с целью перехода на орбиту ее искусственного спутника, мягкая посадка. Маневр — это сложная и ответственная операция, от успеха которой обычно существенно зависит выполнение всей намеченной программы полета. Расчет маневра и управление его осуществлением выполняется с помощью ЭВМ. Космические исследования базируются на новейших достижениях во многих областях человеческих знаний. В частности, они были бы невозможны без современных вычислительных машин.

В заключение подчеркнем еще раз, что математические модели позволяют свести исследование реального «нематематического» объекта к решению математической задачи, открывая тем самым возможность использования для его изучения хорошо разработанного математического аппарата в сочетании с мощной вычислительной техникой. На этом основано применение математики для познания законов реального мира и их использования в практике.

ГЛАВА 2

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Построение модели рассматриваемого объекта позволяет поставить задачу его изучения как математическую. После этого наступает второй этап исследования — поиск метода решения сформулированной математической задачи. Следует иметь в виду, что в прикладных работах нас, как правило, интересуют количественные значения искомых величин, т. е. ответ должен быть доведен «до числа». Все расчеты проводятся с числами, записанными в виде конечных десятичных дробей, поэтому результаты вычислений всегда носят приближенный характер. Стало быть, важно добиться того, чтобы ошибки укладывались в рамки требуемой точности.

§ 1. Понятие алгоритма

В большинстве задач, с которыми вы встречались до сих пор в математике, ответ давался в виде формулы. Формула определяла последовательность математических операций, которую нужно выполнить для вычисления искомой величины. Например, формула корней квадратного уравнения позволяет найти их по значениям коэффициентов этого уравнения, формула Герона выражает площадь треугольника через длины его сторон и т. д.

Однако вам известны задачи, для которых ответ легко может быть найден, хотя он и не записывается в виде формулы. Вспомните младшие классы, когда вы учили целые числа и арифметические операции над ними. Можно ли назвать «формулой» правило вычисления суммы нескольких чисел с помощью поразрядного сложения столбиком? В то же время это правило полностью решает поставленную задачу: оно определяет последовательность математических операций, которую нужно выполнить для вычисления искомой величины.

Рассмотрим еще один известный вам пример — задачу отыскания наибольшего общего делителя (НОД) двух целых чисел n_1, n_2 (для определенности предположим, что $n_1 > n_2$). Общей формулы для решения этой задачи, которая выражала бы НОД через заданные числа n_1, n_2, не существует. Однако можно указать универсальные методы, которые позволяют найти НОД любых двух целых чисел.

Один из таких методов заключается в последовательном переборе чисел n_2, n_2-1, n_2-2 и т. д. Процесс продолжается до тех пор, пока мы не обнаружим число, являющееся одновременно делителем n_1 и n_2. Такой подход всегда приведет к решению поставленной задачи, хотя вряд ли нужно доказывать, что он является трудоемким и неэффективным.

Рассмотрим другой, более интересный метод решения той же задачи. Разделим n_1 на n_2 в целых числах с остатком. Пусть при таком делении получены частное r_1 и остаток n_3 ($0 \leqslant n_3 < n_2$). Это означает, что число n_1 представимо в виде

$$n_1 = r_1 n_2 + n_3. \qquad (1)$$

Если остаток n_3 равен нулю, то задача решена: число n_2 — НОД пары чисел n_1, n_2. Если $n_3 \neq 0$, из (1) вытекает следующее утверждение: всякий общий делитель чисел n_1, n_2 является одновременно общим делителем чисел n_2, n_3, и наоборот. Отсюда, в частности, следует, что НОД чисел n_1, n_2 равен НОД чисел n_2, n_3.

Будем теперь искать НОД чисел n_2, n_3. Для этого снова разделим n_2 на n_3 в целых числах с остатком. Пусть при этом получился остаток n_4 ($0 \leqslant n_4 < n_3 < n_2$). Если он равен нулю, то искомый НОД равен n_3. В противном случае заменим пару чисел n_2, n_3 на пару чисел n_3, n_4 и продолжим процесс. В результате после конечного числа шагов, не превышающего n_2, мы придем к решению рассматриваемой задачи.

Итак, мы видим, что для решения математической задачи важно указать систему правил, которая задает строго определенную последовательность математических операций, приводящих к искомому ответу. Такую систему правил называют *алгоритмом*. Понятие алгоритма в его общем виде относится к числу основных понятий математики.

В простейшем случае последовательность математических операций, с помощью которых можно вычислить искомые величины, определяется формулами. Так, формула Герона является алгоритмом вычисления площади треуголь-

ника по его сторонам. Однако описанный выше метод нахождения НОД дает пример алгоритма, который не сводится к формуле. Его называют *алгоритмом Евклида*.

Алгоритмы решения многих математических задач, для которых не удается получить ответ в виде формулы, основаны на следующей процедуре: строится бесконечный процесс, сходящийся к искомому решению. Он обрывается на некотором шаге (вычисления нельзя продолжать бесконечно), и полученная таким образом величина приближенно принимается за решение рассматриваемой задачи. Сходимость процесса гарантирует, что для любой заданной точности $\varepsilon > 0$ найдется такой номер шага N, что на этом шаге ошибка в определении решения задачи не превысит ε.

Таблица 1

k	$n=6\cdot 2^k$	p_n	q_n
0	6	3, 000 000 000 000	3, 464 101 615 138
1	12	3, 105 828 541 230	3, 630 002 002 236
2	24	3, 132 628 613 281	3, 245 155 564 194
3	48	3, 139 350 203 047	3, 166 557 423 678
4	96	3, 141 031 950 890	3, 147 778 817 495
5	192	3, 141 452 472 285	3, 143 135 797 312
6	384	3, 141 557 607 912	3, 141 978 227 840
7	768	3, 141 583 892 148	3, 141 689 033 932
8	1 536	3, 141 590 463 228	3, 141 616 747 849
9	3 072	3, 141 592 105 999	3, 141 598 677 103
10	6 144	3, 141 592 516 692	3, 141 594 159 465
11	12 288	3, 141 592 619 365	3, 141 593 030 058
12	24 576	3, 141 592 645 034	3, 141 592 747 706
13	49 152	3, 141 592 651 034	3, 141 592 677 119
14	98 304	3, 141 592 653 055	3, 141 592 659 472
15	196 608	3, 141 592 653 456	3, 141 592 655 060
16	393 216	3, 141 592 653 556	3, 141 592 653 957

Для иллюстрации этого подхода к решению математических задач рассмотрим два простых примера. Первый пример связан с задачей о длине окружности и вычислении числа π. На подробном разборе задачи мы останавливаться не будем, поскольку она хорошо известна из средней школы. Приведем лишь табл. 1, в которой приводятся результаты расчетов периметров правильных многоугольников, вписанных в окружность с диаметром $d=1$ и описанных вокруг нее. Таблица начинается с известных периметров вписанного

и описанного шестиугольников: $p_6 = 3$, $q_6 = 2\sqrt{3}$. Далее периметры многоугольников рассчитывались по этим данным с помощью формулы удвоения. Последняя строка таблицы соответствует вписанному и описанному многоугольникам с числом сторон $n = 6 \cdot 2^{16} = 393\,216$ (результат 16-кратного удвоения числа сторон).

С ростом n периметры p_n вписанных многоугольников растут, а периметры q_n описанных многоугольников убывают, стремясь в пределе к длине окружности:

$$\lim_{n \to \infty} p_n = \lim_{n \to \infty} q_n = \pi.$$

Таким образом, периметры p_n определяют число π с недостатком, q_n — с избытком:

$$p_n < \pi < q_n. \qquad (2)$$

Двусторонняя оценка (2) позволяет легко контролировать точность на каждом шаге вычислений. Составляя разность периметров q_n и p_n, приведенных в последней строке табл. 1, получим

$$\varepsilon_n < \Delta_n = q_n - p_n = 0{,}000\,000\,000\,401.$$

Первые 10 знаков чисел p_n и q_n в этой строке совпадают. Они дают первые 10 знаков числа

$$\pi = 3{,}141\,592\,653\ldots$$

Заканчивая обсуждение этого вопроса, приведем некоторые факты из истории вычисления числа π. Великий древнегреческий ученый Архимед, используя формулу удвоения, дошел до правильного 96-угольника и получил следующую двустороннюю оценку π:

$$3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$$

$$\left(3\frac{10}{71} = 3{,}14084\ldots,\ 3\frac{1}{7} = 3{,}14285\ldots,\ \Delta \approx 0{,}002\right).$$

Чтобы правильно понять значение этого результата, нужно иметь в виду, что в то время не было привычной для нас позиционной записи чисел, десятичных дробей и хорошо разработанной техники извлечения квадратных корней, хотя такую операцию Архимеду приходилось выполнять на каждом шаге два раза.

В первой половине XV в. в знаменитой обсерватории хана Улугбека под Самаркандом его придворный астроном

Аль-Каши вычислил π с 17 знаками после запятой. Он сделал 27 удвоений числа сторон и дошел до $6 \cdot 2^{27}$-угольника. Это был уникальный для своего времени расчет. Вычисления Аль-Каши были связаны с составлением таблицы синусов с шагом в $1'$, нужной для астрономических наблюдений. Для сравнения укажем, что в Европе французский математик Ф. Виет (вы знаете его теорему о корнях квадратного уравнения) в 1593 г., т. е. спустя 150 лет после Аль-Каши, нашел лишь 9 цифр числа π после запятой с помощью периметра $6 \cdot 2^{16}$-угольника (16 удвоений числа сторон). Только на рубеже XVI и XVII в. результат Аль-Каши был повторен, а затем и превзойден.

К концу XIX в. английский математик В. Шенкс вычислил 707 знаков числа π, затратив на это более 20 лет. Такой результат по праву получил славу рекорда вычислений XIX в. Однако в 1945 г. было обнаружено, что В. Шенкс допустил ошибку в 520-м знаке и все его последующие вычисления пошли насмарку. В настоящее время с помощью ЭВМ число π вычислено с фантастической точностью — более 500 тыс. знаков. Продолжительность расчетов подобного типа зависит от используемого алгоритма и быстродействия ЭВМ. Обычно она измеряется несколькими часами.

В качестве второго примера рассмотрим задачу об извлечении квадратного корня из произвольного положительного числа a. Эта задача может быть решена разными способами. Мы опишем алгоритм, основанный на построении монотонной последовательности, сходящейся к $\sqrt{a}$.

Выберем в качестве x_0 произвольное положительное число и рассмотрим последовательность $\{x_n\}$, определенную с помощью *рекуррентной формулы* *):

$$x_{n+1} = \frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right), \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, \tag{3}$$

где a — положительное число, из которого нужно извлечь

---

*) *Рекуррентная формула* (от латинского recurrens — возвращающийся) — формула, позволяющая выразить $(n+1)$-й член последовательности через значения ее первых n членов. В данном случае мы имеем простейшую рекуррентную формулу, в которой $(n+1)$-й член выражается прямо через n-й. При наличии рекуррентной формулы последовательность полностью определяется выбором нулевого члена x_0. Способ задания последовательностей с помощью рекуррентных формул является очень распространенным. Он прост и удобен для расчетов на ЭВМ.

квадратный корень. Анализ этой последовательности позволяет установить следующие свойства.

1. Члены последовательности $\{x_n\}$ при $n=1, 2, \ldots$ удовлетворяют неравенству

$$x_n \geqslant \sqrt{a}. \tag{4}$$

Перепишем (3) в виде

$$x_n = \sqrt{a}\,\frac{1}{2}\left(\frac{x_{n-1}}{\sqrt{a}} + \frac{\sqrt{a}}{x_{n-1}}\right) = \sqrt{a}\,\frac{1}{2}\left(t_{n-1} + \frac{1}{t_{n-1}}\right),$$

$$n=1, 2, \ldots,$$

где $t_{n-1} = \frac{x_{n-1}}{\sqrt{a}}$. Функция $f(t) = \frac{1}{2}\left(t + \frac{1}{t}\right)$ при любом положительном t удовлетворяет неравенству $f(t) \geqslant 1$. Отсюда получаем (4).

2. Члены последовательности $\{x_n\}$ при $n=1, 2, \ldots$ не возрастают, т. е.

$$x_{n+1} \leqslant x_n, \qquad n=1, 2, \ldots \tag{5}$$

Разделив (3) на x_n и воспользовавшись неравенством $a/x_n^2 \leqslant 1$, получим

$$\frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{a}{x_n^2}\right) \leqslant 1,$$

т. е. неравенство (5).

Итак, мы видим, что при $n=1, 2, \ldots$ рекуррентная последовательность (3) — монотонно невозрастающая (5) и ограниченная снизу (4). Следовательно, по теореме Вейерштрасса о монотонных последовательностях она имеет предел:

$$\lim_{n\to\infty} x_n = c. \tag{6}$$

Учитывая это, перейдем в (3) к пределу при $n\to\infty$. В результате получим $c = \frac{1}{2}\left(c + \frac{a}{c}\right)$, или

$$c = \sqrt{a}. \tag{7}$$

Итак, мы доказали, что при выборе в качестве нулевого приближения x_0 любого положительного числа рекуррентная последовательность (3) сходится к $\sqrt{a}$:

$$\lim_{n\to\infty} x_n = \sqrt{a}, \tag{8}$$

монотонно приближаясь к своему пределу сверху.

Сходимость (8) означает, что для любой заданной точности $\varepsilon>0$ можно указать такой номер N, что член последовательности x_N, а также все дальнейшие члены удовлетворяют неравенству

$$0 \leqslant x_N - \sqrt{a} < \varepsilon, \quad \text{или} \quad \sqrt{a} \leqslant x_N < \sqrt{a} + \varepsilon,$$

т. е. x_N определяет $c=\sqrt{a}$ с ошибкой меньше ε.

О достигнутой точности на n-м шаге можно судить по следующей оценке:

$$x_n - \sqrt{a} = \frac{x_n^2 - a}{x_n + \sqrt{a}} < \frac{x_n^2 - a}{2c_0}, \tag{9}$$

где c_0 — некоторое число, удовлетворяющее неравенству $0 < c_0 \leqslant c = \sqrt{a}$. Практически за c_0 удобно взять грубое приближенное значение $\sqrt{a}$ по недостатку.

Число *итераций* *) N, необходимое для достижения точности ε, зависит как от требуемой точности, так и от близости нулевого приближения к искомому корню c.

Для оценки скорости сходимости метода положим $x_n = \sqrt{a} + \delta_n$ ($\delta_n = x_n - \sqrt{a} \geqslant 0$ при $n = 1, 2, \ldots$) и подставим в (3):

$$\sqrt{a} + \delta_{n+1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{a} + \delta_n + \frac{a}{\sqrt{a} + \delta_n}\right),$$

или

$$\delta_{n+1} = \frac{\delta_n^2}{2(\sqrt{a} + \delta_n)} \leqslant \frac{\delta_n^2}{2\sqrt{a}}. \tag{10}$$

Такая рекуррентная оценка погрешности говорит о высокой скорости сходимости процесса.

Для иллюстрации данного метода вычислим $\sqrt{81725{,}3}$ За нулевое приближение примем $x_0 = 300$. Это — значение корня с избытком, которое получается при замене подкоренного числа на 90000.

Нулевое приближение выбрано достаточно близким к корню: его погрешность δ_0 не превышает 15. По формуле (10) легко получить оценки погрешностей следующих при-

---

*) *Итерация* (от латинского iteratio — повторение) — результат неоднократного применения какой-нибудь математической операции, в данном случае вычислений по рекуррентной формуле (3).

ближений:

$$\delta_1 < \frac{225}{2\cdot 250} < 0{,}5, \qquad \delta_2 < \frac{0{,}25}{2\cdot 250} = 0{,}0005$$

(для упрощения оценок $\sqrt{a}$ в знаменателе формулы (10) заменим на меньшее число: 250). Мы видим, что уже второе приближение дает весьма высокую точность.

После этого анализа выпишем несколько первых приближений:

$$x_1 = 286{,}203\,833\,334, \qquad x_4 = 285{,}876\,371\,881,$$
$$x_2 = 285{,}876\,564\,976, \qquad x_5 = 235{,}876\,371\,881.$$
$$x_3 = 285{,}876\,371\,881,$$

Обратите внимание на то, что после третьего шага числа x_n перестали изменяться, процесс «останавливается». В этом проявляется принципиальная особенность вычислений с конечным числом значащих цифр. Когда на третьем шаге мы достигли погрешности, не превышающей 10^{-9}, то при расчетах с девятью знаками после запятой становится невозможно уловить разницу между x_{n+1} и x_n, лежащую за пределами ошибки округления. Чтобы продолжить расчет дальше и получить значение корня с более высокой степенью точности, нужно перейти к вычислениям с большим числом значащих цифр.

Мы рассмотрели два примера, которые показывают, как бесконечный сходящийся процесс может быть использован для приближенного решения математической задачи. Пусть слова «приближенное решение» вас не пугают, не воспринимайте их как «решение второго сорта». Если вы найдете в какой-нибудь задаче ответ в виде формулы и захотите подсчитать по ней численное значение искомой величины, то из-за представления чисел при вычислениях конечными десятичными дробями все равно получите для нее приближенное значение. Напомним, наконец, что в прикладных исследованиях решение математической задачи принципиально дает лишь приближенную информацию относительно изучаемого объекта, о чем подробно говорилось в главе 1.

Проблема применения алгоритмов, использующих бесконечный сходящийся процесс,— не в приближенном характере ответа, а в большом объеме необходимых вычислений. Не случайно такие алгоритмы принято называть *вычислительными алгоритмами*, а основанные на них методы решения математических задач — *численными методами*. Широкое применение вычислительных алгоритмов стало возмож-

ным благодаря ЭВМ. До их появления численные методы использовались редко и только в сравнительно простых случаях в силу чрезвычайной трудоемкости вычислений вручную.

В заключение сделаем несколько замечаний общего характера:

1) При разработке вычислительных алгоритмов особенное внимание уделяется тому, чтобы они были удобны для машинного счета.

2) Опыт показывает, что гораздо выгоднее развивать универсальные алгоритмы для решения широкого класса типичных математических задач, чем строить частные алгоритмы для решения каждой задачи в отдельности.

3) Изучение объектов самой различной природы часто приводит к одним и тем же математическим задачам. Поэтому имеется благоприятная возможность выделить задачи, которые часто встречаются в приложениях, изучить их особенности, разработать эффективные алгоритмы и реализовать эти алгоритмы в виде стандартных программ для ЭВМ.

В следующих параграфах этой главы мы продолжим знакомство с вычислительными алгоритмами, рассматривая хорошо известную из средней школы задачу — решение уравнений. Уравнения сыграли важную роль в истории математики, в развитии ее идей и методов. В то же время они и сегодня представляют большой интерес, поскольку часто встречаются в теоретических и прикладных задачах. Выбранные для обсуждения алгоритмы решения уравнений основаны на разных идеях, каждый из них обладает определенными достоинствами. Поэтому в конце главы будет интересно сравнить их между собой и обсудить на этом материале ряд общих вопросов, связанных с численным решением математических задач.

§ 2. Уравнения. Теорема о существовании корня непрерывной функции

В школьном курсе математики изучаются линейные и квадратные уравнения, корни которых могут быть найдены по известным формулам. Существуют также формулы для решения уравнений третьей и четвертой степеней, однако они очень сложны и неудобны для практического применения. Мы не будем приводить этих формул и останавливаться на их обсуждении, чтобы не отвлекаться от основной цели разговора.

Методы решения линейных и квадратных уравнений были известны еще древним грекам. Решение уравнений третьей и четвертой степеней было получено усилиями итальянских математиков Ш. Ферро, Н. Тартальи, Дж. Кардано, Л. Феррари в XV в. в эпоху Возрождения. Затем наступила пора поиска формул для корней уравнений пятой и более высоких степеней. В них принимали участие многие крупнейшие математики. Настойчивые, но безрезультатные попытки продолжались около 300 лет и завершились в 20-х годах XIX в. благодаря работам норвежского математика Н. Абеля. Он доказал, что общее уравнение пятой и более высоких степеней неразрешимо в радикалах. Решения общего уравнения n-й степени

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n = 0, \quad a_0 \neq 0, \qquad (11)$$

при $n \geqslant 5$ нельзя выразить через коэффициенты с помощью арифметических действий и извлечения корней.

Если мы будем рассматривать неалгебраические уравнения, то задача еще больше усложнится. В этом случае найти для корней явные выражения, за редким исключением, не удается.

Возьмем в качестве примера очень простое уравнение

$$x = \cos x. \qquad (12)$$

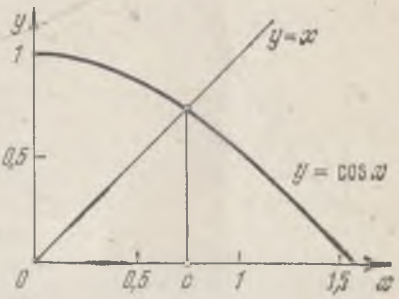


Рис. 6. Графическое решение уравнения $y = \cos x$.

Построим графики функций, стоящих в левой и правой части. Как видно из рис. 6, они пересекаются при $x = c$ $(0 < c < 1)$. Число c является корнем уравнения (12), однако получить для него формулу невозможно.

В условиях, когда формулы «не работают», когда рассчитывать на них можно только в самых простейших случаях, важное значение приобретают универсальные вычислительные алгоритмы. Известен целый ряд алгоритмов решения рассматриваемой математической задачи. Если записать уравнение в виде

$$f(x) = 0, \qquad (13)$$

то эти алгоритмы обычно не накладывают никаких ограни-

чений на конкретный вид функции $f(x)$, а предполагают только, что она обладает некоторыми свойствами типа непрерывности, дифференцируемости и т. д. Мы познакомимся с тремя алгоритмами. Однако прежде чем перейти к их описанию и обоснованию, рассмотрим некоторые общие вопросы качественного исследования уравнений.

Часто при решении уравнений важно знать заранее, имеет ли оно корни, и если имеет, то где они, примерно, располагаются. Рассмотрим квадратное уравнение

$$ax^2+bx+c=0. \qquad (14)$$

Если подсчитать его дискриминант $\delta=b^2-4ac$ и убедиться, что он положителен, то можно сделать следующий вывод: уравнение (14) имеет два действительных корня: один из них лежит левее точки $x_0=-b/(2a)$, другой — правее.

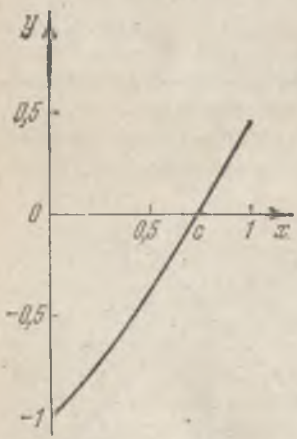


Рис. 7. Пример функции, непрерывной на отрезке [0, 1] и принимающей на концах отрезка значения разных знаков.

Этот случай тривиален — наш вывод основан на формуле для корней, т. е. на известном решении задачи. Гораздо важнее научиться проводить исследование уравнений, не имея под рукой готового ответа.

Посмотрите на рис. 7. На нем изображен график некоторой функции $f(x)$, непрерывной на отрезке $[0, 1]$ и принимающей на концах отрезка значения разных знаков: $f(0)<0$, $f(1)>0$. График является непрерывной линией, которую можно нарисовать, не отрывая карандаша от бумаги. Линия должна перейти из нижней полуплоскости $y<0$ в верхнюю $y>0$. При этом она не может «перепрыгнуть» через ось x, а должна ее обязательно пересечь в некоторой точке $x=c$. В этой точке функция $f(x)$ обращается в нуль, т. е. число c является корнем уравнения (13).

Мы рассуждали на интуитивном уровне, теперь сформулируем результат в виде теоремы.

Теорема о существовании корня непрерывной функции. *Если функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$ и принимает на его концах значения*

разных знаков, то на этом отрезке существует по крайней мере один корень уравнения (13).

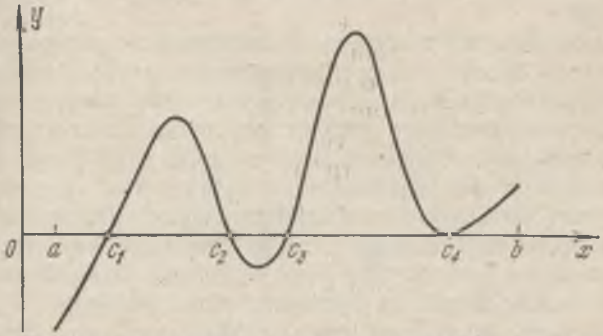


Рис. 8. Пример непрерывной функции, имеющей на отрезке $[a, b]$ четыре корня.

Обратите внимание на то, что, гарантируя существование решения уравнения, теорема не позволяет определить число его корней. На рис. 8 в качестве примера приведен

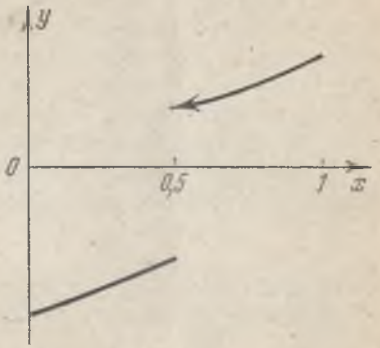


Рис. 9. Пример разрывной функции, принимающей на концах отрезка $[a, b]$ значения разных знаков, но не имеющей на этом отрезке корней.

график функции, удовлетворяющей условиям теоремы и имеющей на рассматриваемом отрезке четыре корня.

Требование непрерывности функции $f(x)$ во всех точках отрезка $[a, b]$ существенно. При наличии хотя бы одной точки разрыва утверждение теоремы становится неверным. Соответствующий пример показан на рис. 9. Мы видим на нем график разрывной функции, которая принимает на концах отрезка $[a, b]$ значения разных знаков, но не имеет корней.

Сформулированная теорема относится к числу так называемых *теорем существования*. Таких теорем, устанавливаю-

щих условия разрешимости различных математических задач, очень много. С некоторыми из них мы познакомимся в этой книге.

Доказательства теорем существования можно разделить на два типа. Бывают конструктивные доказательства, основу которых составляет метод фактического построения искомого решения. Они играют особенно важную роль в прикладной математике, в которой всегда требуется получить решение рассматриваемой задачи.

Наряду с этим весьма часто встречаются неконструктивные доказательства теорем существования. Как правило, они основаны на рассуждениях от противного: цепь логических заключений показывает, что решение обязано существовать, ибо в противном случае получится противоречие. В качестве характерного примера теоремы с неконструктивным доказательством можно привести основную теорему высшей алгебры. Она утверждает, что всякое алгебраическое уравнение (11) имеет по крайней мере один корень (вообще говоря, комплексный).

В следующем параграфе мы приведем конструктивное доказательство теоремы существования корня у непрерывной функции, которое нам даст один из самых простых и эффективных алгоритмов численного решения уравнений. Сейчас же рассмотрим несколько примеров, показывающих, как эта теорема применяется при исследовании уравнений.

В качестве первого примера обратимся еще раз к уравнению (12), которое предварительно перепишем в виде (13):

$$f(x) = x - \cos x = 0.$$

Функция $f(x) = x - \cos x$ непрерывна на отрезке $[0, 1]$, а ее значения на концах отрезка имеют разные знаки:

$$f(0) = -1 < 0, \quad f(1) = 1 - \cos 1 > 0.$$

Отсюда сразу следует существование на отрезке $[0, 1]$ по крайней мере одного корня уравнения (12). Раньше мы пришли к этому выводу с помощью наглядных, но математически нестрогих геометрических соображений. Теперь этот вывод — прямое следствие сформулированной теоремы.

Мы уже говорили, что теорема не позволяет определить общего числа корней. Однако в данном случае это легко сделать с помощью дополнительного исследования. Вычислим производную функции $f(x)$:

$$f'(x) = 1 + \sin x.$$

В интересующей нас области изменения переменной x: $x \in [0, 1]$ она положительна. Следовательно, функция $f(x)$ на отрезке $[0, 1]$ монотонно возрастает и может иметь только один корень.

В качестве второго примера рассмотрим алгебраическое уравнение (11) произвольной нечетной степени n. Обозначим многочлен, стоящий в левой части уравнения, через $P_n(x)$ и отметим, что функция $P_n(x)$ непрерывна на всей числовой прямой. Знак многочлена при достаточно больших по модулю значениях x совпадает со знаком его старшего члена a_0x^n. В силу нечетности n он различен для отрицательных и положительных x. Это позволяет утверждать, что всякое алгебраическое уравнение нечетной степени имеет по крайней мере один действительный корень.

На уравнения четной степени вывод не распространяется, в чем легко убедиться на примере простейшего уравнения

$$x^2 + 1 = 0.$$

Однако для них с помощью данной теоремы можно установить другой результат: если в алгебраическом уравнении произвольной четной степени n знаки коэффициентов a_0 и a_n противоположны, то это уравнение имеет по крайней мере один отрицательный и один положительный корень.

Предположим для определенности, что $a_0 > 0$, $a_n < 0$. Тогда при больших по модулю значениях x многочлен $P_n(x)$, как и его старший член a_0x^n, принимает положительное значение. В то же время при $x = 0$ он принимает отрицательное значение: $P_n(0) = a_n < 0$. Отсюда сразу следует требуемое утверждение.

Познакомившись на этих примерах с методом предварительного качественного исследования уравнений, перейдем теперь к обсуждению вычислительных алгоритмов для нахождения их корней. Первый из них, который мы рассмотрим в следующем параграфе, будет одновременно и методом доказательства теоремы о корне непрерывной функции.

§ 3. Метод вилки

В артиллерии существует следующий метод пристрелки: один снаряд посылают с недолетом, другой — с перелетом, и при этом говорят, что цель взята в «вилку». Послав следующий снаряд со средним значением прицела между двумя предыдущими, смотрят, как он упадет — с недолетом или

перелетом. В результате «вилка» сужается. Такая корректировка прицела продолжается до тех пор, пока снаряды не накроют цель.

Доказательство теоремы о корне непрерывной функции, которое мы приведем в этом параграфе, основано на идее «артиллерийской вилки». Строится последовательность вложенных друг в друга отрезков $[a_n, b_n]$. Их концы образуют монотонные последовательности, одна из которых $\{a_n\}$ («недолеты») сходится к некоторой точке $x=c$ снизу ($a_n \leqslant c$), вторая $\{b_n\}$ («перелеты») — сверху ($b_n \geqslant c$). Доказывается, что при выполнении условий теоремы предельная точка $x=c$ является корнем уравнения (13). В результате устанавливается существование решения этого уравнения на отрезке $[a, b]$. Процесс построения последовательности вложенных отрезков, содержащих искомый корень $x=c$, позволяет найти его приближенно с любой точностью ε (подобно вычислению π по периметрам правильных вписанных и описанных многоугольников p_n и q_n).

После этих вводных замечаний перейдем к доказательству теоремы. Предположим для определенности, что функция $f(x)$ принимает на левом конце отрезка $[a, b]$ отрицательное значение, на правом — положительное:

$$f(a) < 0, \qquad f(b) > 0.$$

Возьмем среднюю точку отрезка $[a, b]$ $\xi=(a+b)/2$ и вычислим в ней значение функции $f(x)$. Если $f(\xi)=0$, то утверждение теоремы доказано: мы нашли на отрезке $[a, b]$ точку $c=\xi$, в которой наша функция обращается в нуль. Если $f(\xi)\neq 0$, поступим следующим образом: рассмотрим два отрезка $[a, \xi]$ и $[\xi, b]$ и выберем один из них, исходя из условия, чтобы функция $f(x)$ принимала на его концах значения разных знаков. Выбранный отрезок обозначим $[a_1, b_1]$. По построению

$$f(a_1) < 0, \qquad f(b_1) > 0.$$

Затем возьмем среднюю точку отрезка $[a_1, b_1]$ $\xi_1 = (a_1+b_1)/2$ и вычислим в ней значение функции $f(\xi_1)$. Если $f(\xi_1)=0$, то доказательство теоремы закончено. Если же $f(\xi_1)\neq 0$, снова рассмотрим два отрезка $[a_1, \xi_1]$, $[\xi_1, b_1]$ и выберем тот, на концах которого функция $f(x)$ принимает значения разных знаков. Выбранный отрезок обозначим $[a_2, b_2]$. По построению

$$f(a_2) < 0, \qquad f(b_2) > 0.$$

Будем продолжать этот процесс. В результате он либо оборвется на некотором шаге n в силу того, что $f(\xi_n)=0$, либо будет продолжаться неограниченно. В первом случае вопрос о существовании корня уравнения (13) решен, поэтому нам нужно рассмотреть второй случай.

Неограниченное продолжение процесса дает последовательность отрезков $[a, b]$, $[a_1, b_1]$, $[a_2, b_2]$, ... Эти отрезки вложены друг в друга — каждый последующий отрезок принадлежит всем предыдущим:

$$a_n \leqslant a_{n+1} < b_{n+1} \leqslant b_n, \tag{15}$$

причем

$$f(a_n) < 0, \qquad f(b_n) > 0.$$

Длины отрезков с возрастанием номера n стремятся к нулю:

$$\lim_{n \to \infty} (b_n - a_n) = \lim_{n \to \infty} \frac{b-a}{2^n} = 0.$$

Рассмотрим левые концы отрезков. Согласно (15) они образуют монотонно неубывающую ограниченную последовательность $\{a_n\}$. Такая последовательность имеет предел, который мы обозначим через c_1:

$$\lim_{n \to \infty} a_n = c_1. \tag{16}$$

Согласно (15) и теореме о переходе к пределу в неравенствах имеем

$$c_1 \leqslant b_n. \tag{17}$$

Теперь рассмотрим правые концы отрезков. Они образуют монотонно невозрастающую ограниченную последовательность $\{b_n\}$, которая тоже имеет предел. Обозначим этот предел через c_2:

$$\lim_{n \to \infty} b_n = c_2. \tag{18}$$

Согласно неравенству (17) пределы c_1 и c_2 удовлетворяют неравенству $c_1 \leqslant c_2$.

Итак,

$$a_n \leqslant c_1 \leqslant c_2 \leqslant b_n$$

и, следовательно,

$$c_2 - c_1 \leqslant b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}.$$

Таким образом, разность $c_2 - c_1$ меньше любого наперед

заданного положительного числа. Это означает, что $c_2 - c_1 = 0$, т. е.

$$c_1 = c_2 = c. \tag{19}$$

Найденная точка c интересна тем, что она является единственной общей точкой для всех отрезков построенной последовательности. Используя непрерывность функции $f(x)$, докажем, что она является корнем уравнения (13).

Мы знаем, что $f(a_n) < 0$. Согласно определению непрерывности и возможности предельного перехода в неравенствах имеем

$$f(c) = \lim_{n \to \infty} f(a_n) \leqslant 0. \tag{20}$$

Аналогично, учитывая, что $f(b_n) > 0$, получаем

$$f(c) = \lim_{n \to \infty} f(b_n) \geqslant 0. \tag{21}$$

Из (20) и (21) следует, что

$$f(c) = 0, \tag{22}$$

т. е. c — корень уравнения (13). Теорема доказана.

Процесс построения последовательности вложенных стягивающихся отрезков методом вилки является эффективным вычислительным алгоритмом решения уравнения (13). На n-м шаге процесса получаем

$$a_n \leqslant c \leqslant b_n. \tag{23}$$

Это двойное неравенство показывает, что число a_n определяет искомый корень c с недостатком, а число b_n — с избытком с ошибкой, не превышающей длину отрезка $\Delta_n = b_n - a_n = (b-a)/2^n$. При увеличении n ошибка стремится к нулю по закону геометрической прогрессии со знаменателем $q = 1/2$. Если задана требуемая точность $\varepsilon > 0$, то чтобы ее достигнуть, достаточно сделать число шагов N, удовлетворяющее условию

$$N > \log_2 \frac{b-a}{\varepsilon}. \tag{24}$$

В качестве примера применим метод вилки к решению уравнения (12), записанному в виде (13):

$$f(x) = x - \cos x = 0.$$

Результаты расчетов, связанных с 12-кратным делением исходного отрезка $[0, 1]$ пополам, даны в табл. 2. Они определяют корень c с точностью $\varepsilon < (1/2)^{12} < 0{,}00025$.

Таблица 2

n	a_n	b_n	$\xi_n = \frac{a_n + b_n}{2}$	$f(\xi_n)$
0	0,000 000 000 000	1,000 000 000 000	0,500 000 000 000	—0,377 582
1	0,500 000 000 000	1,000 000 000 000	0,750 000 000 000	+0,018 311
2	0,500 000 000 000	0,750 000 000 000	0,625 000 000 000	—0,185 963
3	0,625 000 000 000	0,750 000 000 000	0,687 500 000 000	—0,085 335
4	0,687 500 000 000	0,750 000 000 000	0,718 750 000 000	—0,033 879
5	0,718 750 000 000	0,750 000 000 000	0,734 375 000 000	—0,007 875
6	0,734 375 000 000	0,750 000 000 000	0,742 187 500 000	+0,005 196
7	0,734 375 000 000	0,742 187 500 000	0,738 281 250 000	—0,001 345
8	0,738 281 250 000	0,742 187 500 000	0,740 234 375 000	+0,001 924
9	0,738 281 250 000	0,740 234 375 000	0,739 257 812 500	+0,000 289
10	0,738 281 250 000	0,739 257 812 500	0,738 769 531 250	—0,000 528
11	0,738 769 531 250	0,739 257 812 500	0,739 013 671 875	—0,000 120
12	0,739 013 671 875	0,739 257 812 500		

Итак, мы можем утверждать, что искомый корень c принадлежит отрезку [0,739 013 671 875, 0,739 257 812 500]. Отбрасывая десятичные знаки, лежащие за пределами достигнутой точности, получим

$$0{,}73901 < c < 0{,}73926. \tag{25}$$

§ 4. Метод итераций (метод последовательных приближений)

В этом параграфе мы познакомимся еще с одним численным методом решения уравнений. Предположим, что уравнение можно записать в виде

$$x = \varphi(x). \tag{26}$$

Возьмем произвольное значение x_0 из области определения функции $\varphi(x)$ и будем строить последовательность чисел $\{x_n\}$, определенных с помощью рекуррентной формулы

$$x_{n+1} = \varphi(x_n), \quad n = 0, 1, 2, \ldots \tag{27}$$

Последовательность $\{x_n\}$ называется *итерационной последовательностью*. При ее изучении встают два вопроса:

1) Можно ли процесс вычисления чисел x_n продолжать неограниченно, т. е. будут ли числа x_n принадлежать области определения функции $\varphi(x)$?

2) Если итерационный процесс (27) бесконечен, то как ведут себя числа x_n при $n \to \infty$?

Исследование этих вопросов показывает, что при определенных ограничениях на функцию $\varphi(x)$ итерационная последовательность является бесконечной и сходится к корню уравнения (26):

$$\lim_{n \to \infty} x_n = c, \quad c = \varphi(c). \tag{28}$$

Однако для того, чтобы провести это исследование, нам нужно ввести одно новое понятие.

Говорят, что функция $f(x)$ удовлетворяет на отрезке $[a, b]$ *условию Липшица*, если существует такая постоянная α, что для любых x_1, x_2, принадлежащих отрезку $[a, b]$, имеет место неравенство

$$|f(x_1) - f(x_2)| \leqslant \alpha |x_1 - x_2|. \tag{29}$$

Величину α в этом случае называют *постоянной Липшица*.

Если функция $f(x)$, удовлетворяет на отрезке $[a, b]$ условию Липшица, то она непрерывна на нем. Действительно, пусть x_0 — произвольная точка отрезка. Рассмотрим приращение функции $f(x)$ в этой точке:

$$\Delta f = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$$

и оценим его с помощью неравенства (29):

$$|\Delta f| \leqslant \alpha |\Delta x|.$$

Таким образом, $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \Delta f = 0$, что означает непрерывность функции $f(x)$.

Условие Липшица имеет простой геометрический смысл. Возьмем на графике функции $y = f(x)$ две произвольные точки: M_1 с координатами $(x_1, f(x_1))$ и M_2 с координатами $(x_2, f(x_2))$ (рис. 10). Напишем уравнение прямой линии, проходящей через эти точки:

$$y = f(x_1) + k(x - x_1),$$

где k — тангенс угла наклона прямой к оси x — определяется формулой

$$k = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}.$$

Если функция $f(x)$ удовлетворяет на отрезке $[a, b]$ условию Липшица (29), то при произвольном выборе точек M_1 и M_2 имеем $|k| \leqslant \alpha$. Таким образом, с геометриче-

ской точки зрения условие Липшица означает ограниченность тангенса угла наклона секущих, проведенных через всевозможные пары точек графика функции $y=f(x)$.

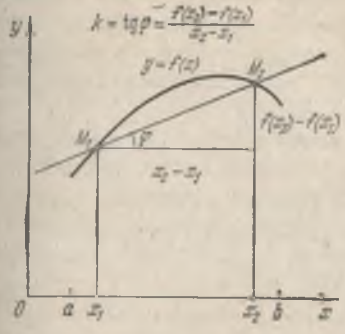


Рис. 10. Геометрическая иллюстрация условия Липшица.

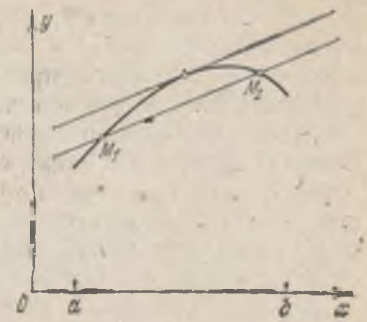


Рис. 11. Геометрическая иллюстрация связи условия Липшица с предположением о дифференцируемости функции.

Предположим, что функция $f(x)$ имеет на отрезке $[a, b]$ ограниченную производную: $|f'(x)|\leqslant m$; тогда она удовлетворяет условию Липшица с постоянной $\alpha=m$. Для доказательства этого утверждения воспользуемся *формулой конечных приращений Лагранжа*:

$$f(x_2)-f(x_1)=f'(\xi)(x_2-x_1), \qquad (30)$$

где x_1, x_2 — произвольные точки отрезка $[a, b]$, ξ — некоторая точка отрезка $[x_1, x_2]$. Возьмем модуль обеих частей равенства (30) и заменим в правой части $|f'(\xi)|$ на m. В результате получим неравенство (29) с $\alpha=m$.

Рис. 11 дает геометрическую иллюстрацию установленного свойства. Согласно формуле Лагранжа (30) каждой секущей графика функции $y=f(x)$ можно поставить в соответствие параллельную ей касательную. Поэтому наибольший тангенс угла наклона секущих не превосходит наибольшего тангенса угла наклона касательных, и его можно оценить той же константой m: $|k|\leqslant m$.

Познакомившись с условием Липшица, перейдем к изучению итерационной последовательности, предполагая, что уравнение (26) имеет корень $x=c$. Существование этого корня можно установить с помощью предварительного качественного исследования уравнения с применением теоремы § 2.

Теорема о сходимости итерационной последовательности. *Пусть c — корень уравнения* (26) *и пусть функция* $\varphi(x)$ *удовлетворяет на некотором отрезке* $[c-\delta, c+\delta]$ $(\delta>0)$ *условию Липшица с постоянной* $\alpha<1$. *Тогда при любом выборе* x_0 *на отрезке* $[c-\delta, c+\delta]$ *существует бесконечная итерационная последовательность* $\{x_n\}$ (27) *и эта последовательность сходится к корню* $x=c$, *который является единственным решением уравнения* (26) *на отрезке* $[c-\delta, c+\delta]$.

Сформулированная теорема имеет очень простой смысл. Будем говорить, что функция φ осуществляет отображение точки x на точку $y=\varphi(x)$. Тогда условие Липшица с постоянной $\alpha\leqslant 1$ означает, что отображение φ является сжимающим: расстояние между точками x_1 и x_2 больше, чем расстояние между их изображениями $y_1=\varphi(x_1)$ и $y_2=\varphi(x_2)$.

Корень c является неподвижной точкой отображения φ, он преобразуется сам в себя: $c=\varphi(c)$. Поэтому каждый шаг в итерационном процессе (27), сжимая расстояния, должен приближать члены последовательности $\{x_n\}$ к неподвижной точке c.

После этих соображений, поясняющих смысл теоремы, перейдем к ее доказательству. Возьмем произвольную точку x_0 на отрезке $[c-\delta, c+\delta]$, она отстоит от точки c не больше, чем на δ: $|c-x_0|\leqslant\delta$.

Вычислим x_1: $x_1=\varphi(x_0)$, при этом $x_1-c=\varphi(x_0)-\varphi(c)$. Разность $\varphi(x_0)-\varphi(c)$ можно оценить с помощью условия Липшица:

$$|x_1-c|=|\varphi(x_0)-\varphi(c)|\leqslant\alpha|x_0-c|\leqslant\alpha\delta. \qquad (31)$$

Неравенство (31) показывает, что x_1 принадлежит отрезку $[c-\delta, c+\delta]$ и расположена ближе к точке c, чем x_0.

Продолжим построение итерационной последовательности. Вычислим x_2 : $x_2=\varphi(x_1)$, при этом

$$|x_2-c|=|\varphi(x_2)-\varphi(c)|\leqslant\alpha|x_1-c|\leqslant\alpha^2|x_0-c|\leqslant\alpha^2\delta.$$

Точка x_2 опять принадлежит отрезку $[c-\delta, c+\delta]$ и расположена ближе к точке c, чем точка x_1, т. е. мы приблизились к c.

По индукции легко доказать, что последующие итерации также существуют и удовлетворяют неравенствам

$$|x_n-c|\leqslant\alpha^n|x_0-c|\leqslant\alpha^n\delta. \qquad (32)$$

Отсюда следует, что

$$\lim_{n\to\infty}(x_n-c)=0, \quad \text{т. е.} \quad \lim_{n\to\infty}x_n=c. \qquad (33)$$

Нам остается доказать, что корень $x=c$ является единственным решением уравнения (26) на отрезке $[c-\delta,\ c+\delta]$. Действительно, допустим, что существует еще один корень $x=c_1$:

$$c_1=\varphi(c_1), \qquad c_1\in[c-\delta,\ c+\delta]. \tag{34}$$

Примем c_1 за нулевое приближение и будем строить итерационную последовательность (27). Тогда с учетом (34) получим $x_n=c_1$ $(n=0,\ 1,\ 2,\ \ldots)$. С другой стороны, по доказанному $\lim\limits_{n\to\infty} x_n=c$, т. е. $c_1=c$. Никаких других решений уравнение (26) на отрезке $[c-\delta,\ c+\delta]$ иметь не может.

Сходимость итерационной последовательности к корню уравнения (26) может быть использована для приближенного определения этого корня с любой степенью точности. Для этого нужно только провести достаточное число итераций.

В качестве примера, иллюстрирующего данный метод, рассмотрим еще раз уравнение $x=\cos x$. Роль функции $\varphi(x)$ в нем играет $\cos x$. Это — дифференцируемая функция, производная которой равна $-\sin x$. На отрезке $[0,\ 1]$

$$|\varphi'(x)|=\sin x\leqslant\sin 1. \tag{35}$$

Таким образом, функция $\varphi(x)=\cos x$ удовлетворяет на отрезке $[0,\ 1]$ условию Липшица с постоянной $\alpha=\sin 1<1$.

Таблица 3

n	x_{2n}	x_{2n+1}
0	0,500 000 000 000	0,877 582 561 890
1	0,639 012 494 166	0,802 685 100 681
2	0,694 778 026 789	0,768 195 831 281
3	0,719 165 445 942	0,752 355 759 420
4	0,730 081 063 138	0,745 120 341 349
5	0,735 006 309 016	0,741 826 522 642
6	0,737 235 725 443	0,740 329 651 877
7	0,738 246 238 333	0,739 649 062 768
8	0,738 704 539 357	0,739 341 452 279
9	0,738 912 449 332	0,739 201 444 135

Результаты вычислений по рекуррентной формуле (27), которая в случае уравнения (12) принимает вид $x_{n+1}=\cos x_n$, даны в табл. 3. За нулевое приближение была

выбрана средняя точка отрезка $x_0=0{,}5$. Для удобства анализа итерационной последовательности ее члены расположены по два в строке. В результате образовались столбцы членов с четными и нечетными номерами. Сравнивая их между собой, мы видим, что четные члены меньше нечетных: итерационная последовательность «скачет» то вверх, то вниз. С возрастанием номера четные члены возрастают, а нечетные — убывают, приближаясь друг к другу. Такое поведение последовательности означает, что корень уравнения (12) лежит между четными и нечетными итерациями; первые дают его значение с недостатком, вторые — с избытком. Это позволяет легко контролировать точность, достигнутую после любого числа итераций: погрешность не превышает разности между последними вычисленными нечетным и четным членами.

Например, мы остановили процесс вычислений на 19-й итерации и можем написать для корня c двойное неравенство:

$$0{,}738\,912\,449\,332 = x_{18} < c < x_{19} = 0{,}739\,201\,444\,135, \quad (36)$$

т. е. члены итерационной последовательности x_{18} и x_{19} определяют c как с недостатком, так и с избытком, с погрешностью, которая не превышает разности $x_{19}-x_{18}$:

$$\varepsilon < \Delta_{19} = x_{19} - x_{18} < 0{,}0003.$$

Точность, которую мы достигли после 19 итераций, примерно соответствует точности 12 шагов в методе вилки. Причина такого различия ясна. В обоих методах погрешность убывает по закону геометрической прогрессии. Для метода вилки знаменатель прогрессии равен 1/2, он не зависит от вида функции $f(x)$. Для метода итераций знаменатель равен α — постоянной Липшица функции $\varphi(x)$. В рассматриваемом примере $\alpha>1/2$, поэтому сходимость метода итераций медленнее сходимости метода вилки. Это означает, что метод итераций имеет преимущество перед методом вилки с точки зрения скорости сходимости только в том случае, когда $\alpha<1/2$.

§ 5. Метод касательных (метод Ньютона)

Метод касательных, связанный с именем И. Ньютона, является одним из наиболее эффективных численных методов решения уравнений. Идея метода очень проста. Предположим, что функция $f(x)$, имеющая корень c на отрезке a, b, дифференцируема на этом отрезке и ее производная

$f'(x)$ не обращается на нем в нуль. Возьмем произвольную точку x_0 и запишем в ней уравнение касательной к графику функции $f(x)$:

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0). \tag{37}$$

Графики функции $f(x)$ и ее касательной близки около точки касания, поэтому естественно ожидать, что точка x_1 пересечения касательной с осью x будет расположена недалеко от корня c (рис. 12).

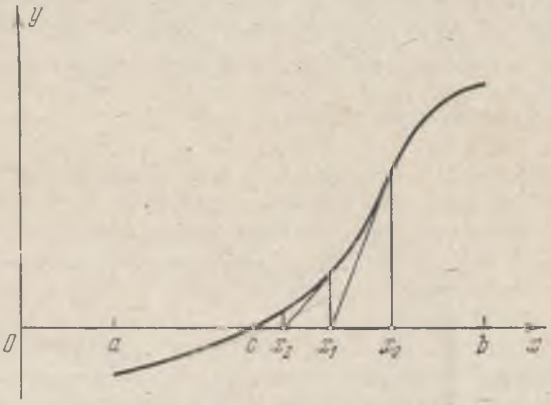


Рис. 12. Построение последовательности $\{x_n\}$ по методу касательных.

Для определения точки x_1 имеем уравнение

$$f(x_0) + f'(x_0)(x_1 - x_0) = 0.$$

Таким образом,

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}. \tag{38}$$

Повторим проделанную процедуру: напишем уравнение касательной к графику функции $f(x)$ при $x = x_1$ и найдем для нее точку пересечения x_2 с осью x (см. рис. 12):

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}.$$

Продолжая этот процесс, получим последовательность $\{x_n\}$, определенную с помощью рекуррентной формулы

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \tag{39}$$

отрезку $[a, b]$, и на этом процесс построения рекуррентной последовательности метода касательных обрывается.

Таким образом, до начала расчетов по данному методу для выбора нулевого приближения x_0 нужно знать область локализации искомого корня $x=c$. Если известен в общих чертах график функции $f(x)$, то ее легко определить по этому графику. В случае необходимости можно сделать несколько шагов по методу вилки. Затруднения, связанные с предварительным исследованием уравнения, вполне окупаются высокой скоростью сходимости метода.

В качестве первого примера применения метода касательных рассмотрим задачу извлечения квадратного корня из произвольного положительного числа a. Будем искать его как решение уравнения

$$f(x)=x^2-a=0. \qquad (47)$$

Рекуррентная формула метода Ньютона (39) в данном случае принимает вид:

$$x_{n+1}=x_n-\frac{x_n^2-a}{2x_n}=\frac{1}{2}\left(x_n+\frac{a}{x_n}\right). \qquad (48)$$

Она совпадает с формулой (3). Таким образом, алгоритм вычисления $\sqrt{a}$ основан на решении уравнения (47) методом Ньютона. Мы уже знаем, что процесс сходится к $\sqrt{a}$ при любом выборе начального приближения $x_0 \in (0, +\infty)$, причем сходимость весьма быстрая.

Второй пример снова будет связан с уравнением $x=\cos x$ (мы уже пользовались этим уравнением для иллюстрации двух предыдущих методов). Запишем для него рекуррентную формулу (39) (помня, что $f(x)=x-\cos x$):

$$x_{n+1}=x_n-\frac{x_n-\cos x_n}{1+\sin x_n}, \qquad n=0,\ 1,\ 2,\ \ldots \qquad (49)$$

Выберем, как и для метода итераций, в качестве нулевого приближения $x_0=0{,}5$ и вычислим несколько следующих приближений по формуле (49):

$x_1=0{,}755\,222\,320\,557,$ $x_4=0{,}739\,085\,078\,239,$
$x_2=0{,}739\,141\,702\,652,$ $x_5=0{,}739\,085\,078\,239.$
$x_3=0{,}739\,085\,197\,449,$

Мы видим, что, начиная с номера $n=1$, последовательность $\{x_n\}$ убывает и приближается к корню $x=c$ сверху. После четвертого шага процесс «останавливается». Мы уже встречались с таким явлением, когда обсуждали алгоритм

вычисления квадратного корня. Остановка связана с тем, что расчеты ведутся с 12 знаками, и после достижения погрешности, не превышающей 10^{-12}, становится невозможно уловить разницу между x_{n+1} и x_n, лежащую за пределами ошибки округления. Если есть необходимость повысить точность, то нужно перейти к расчетам с большим числом знаков. ЭВМ допускают такую возможность.

Примеры вычисления корня (47) и решения уравнения (12) показывают очень высокую скорость сходимости метода касательных. Для уравнения (12) после двух шагов была достигнута точность 10^{-4}, после четырех — 10^{-12}. Для сравнения укажем, что точность 10^{-4} метод вилки обеспечивает на 15-м шаге, метод итераций — на 22-м шаге.

§ 6. Заключительные замечания

Мы познакомились с тремя методами численного решения уравнений. Наряду с ними существуют еще несколько методов, на которых мы не останавливались. Ситуация, когда одну и ту же математическую задачу можно решать с помощью разных методов, является довольно типичной. В таких случаях естественно возникает необходимость сравнения их между собой.

При оценке эффективности численных методов существенное значение имеют различные свойства:

1) универсальность;

2) простота организации вычислительного процесса и контроля за точностью;

3) скорость сходимости.

Посмотрим с этой точки зрения на разработанные методы решения уравнений.

1) Наиболее универсальным является метод вилки: он требует только непрерывности функции $f(x)$. Два других метода накладывают более сильные ограничения. Во многих случаях это преимущество метода вилки может оказаться существенным.

2) С точки зрения организации вычислительного процесса все три метода очень просты. Однако и здесь метод вилки обладает определенным преимуществом. Вычисления можно начинать с любого отрезка $[a, b]$, на концах которого непрерывная функция $f(x)$ принимает значения разных знаков. Процесс будет сходиться к корню уравнения $f(x)=0$, причем на каждом шаге он дает для корня двустороннюю оценку, по которой легко определить достигнутую точность.

При исследовании этой последовательности, как и последовательности (27) метода итераций, встают два вопроса:

1) Можно ли процесс вычисления чисел x_n продолжать неограниченно, т. е. будут ли числа x_n принадлежать отрезку $[a, b]$?

2) Если процесс (39) бесконечен, то как ведет себя последовательность $\{x_n\}$ при $n\to\infty$?

При анализе этих вопросов предположим, что корень $x=c$ является внутренней точкой отрезка $[a, b]$ $(a<c<b)$, а функция $f(x)$ дважды дифференцируема на данном отрезке, причем ее производные удовлетворяют неравенствам

$$|f'(x)|\geqslant m>0, \quad |f''(x)|\leqslant M, \quad x\in[a, b], \qquad (40)$$

и докажем следующую теорему.

Теорема о сходимости метода касательных. *Если функция $f(x)$ удовлетворяет сформулированным условиям, то найдется такое* δ: $0<\delta\leqslant\min(c-a, b-c)$, *что при любом выборе начального приближения на отрезке* $[c-\delta, c+\delta]\subset[a, b]$ *существует бесконечная итерационная последовательность* (39) *и эта последовательность сходится к корню* c.

Доказательство. В силу предположения о дифференцируемости функции $f(x)$ и не равенстве нулю ее производной $f'(x)$ уравнение (13) эквивалентно на отрезке $[a, b]$ уравнению

$$x=\varphi(x), \qquad \varphi(x)=x-\frac{f(x)}{f'(x)}, \qquad (41)$$

так что корень $x=c$ исходного уравнения является одновременно корнем уравнения (41). Исследуем возможность отыскания этого корня с помощью метода итераций.

Вычислим производную функции $\varphi(x)$:

$$\varphi'(x)=1-\frac{(f'(x))^2-f(x)f''(x)}{(f'(x))^2}=\frac{f(x)f''(x)}{(f'(x))^2} \qquad (42)$$

и оценим полученное выражение. Согласно неравенствам (40)

$$|\varphi'(x)|\leqslant\frac{M}{m^2}|f(x)|. \qquad (43)$$

Для дальнейшей оценки $|\varphi'(x)|$ воспользуемся непрерывностью функции $f(x)$ и равенством ее нулю в точке $x=c$:

$$\lim_{x\to c} f(x)=f(c)=0. \qquad (44)$$

Положим $\varepsilon = m^2/(2M)$; тогда в силу (44) для данного ε можно указать такое δ: $0 < \delta \leqslant \min(c-a, b-c)$, что для всех $x \in [c-\delta, c+\delta]$ выполняется неравенство

$$|f(x) - f(c)| = |f(x)| \leqslant \varepsilon = \frac{m^2}{2M}. \tag{45}$$

Учитывая это, получим

$$|\varphi'(x)| \leqslant \frac{M}{m^2} \cdot \frac{m^2}{2M} = \frac{1}{2}. \tag{46}$$

Таким образом, функция $\varphi(x)$ удовлетворяет на отрезке $[c-\delta, c+\delta] \subset [a, b]$ условию Липшица с постоянной $\alpha = 1/2 < 1$. Это означает, что уравнение (41) можно решать методом итераций: при любом выборе нулевого приближения x_0 на отрезке $[c-\delta, c+\delta]$ существует бесконечная последовательность $\{x_n\}$ (27), сходящаяся к корню $x = c$.

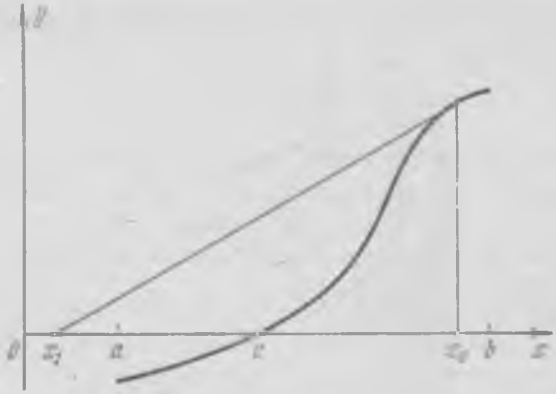


Рис. 13. Случай, когда процесс построения последовательности $\{x_n\}$ обрывается из-за плохого выбора нулевого приближения.

Теперь нам остается заметить, что итерационной последовательностью для уравнения (41), сходимость которой мы только что установили, является последовательность (39) метода касательных. Теорема доказана.

Требование близости нулевого приближения x_0 к искомому корню c является существенным для метода касательных. Так, на рис. 13 изображен график той же функции $f(x)$, что и на рис. 12, однако x_0 выбрано дальше от корня c, чем в первом случае. В результате после первого же шага получается точка x_1, которая не принадлежит исходному

Сходимость же метода итераций или касательных зависит от того, насколько удачно выбрано нулевое приближение.

3) Наибольшей скоростью сходимости обладает метод касательных. В случае, когда подсчет значений функции $f(x)$ сложен и требует больших затрат машинного времени, это преимущество становится определяющим.

Итак, мы видим, что ответ на вопрос о наилучшем численном методе решения уравнений не однозначен. Он существенно зависит от того, какую дополнительную информацию о функции $f(x)$ мы имеем и, в соответствии с этим, каким свойствам метода придаем наибольшее значение.

При обосновании метода итераций и метода Ньютона на функции $\varphi(x)$ и $f(x)$, а также на выбор начального приближения x_0 накладывались определенные ограничения. Однако при решении конкретных задач проверить их выполнение часто бывает трудно и даже практически невозможно. Функция может не задаваться в виде простой формулы, а находиться в результате численного решения некоторой математической задачи, получаться из измерений и т. д. В таких случаях применимость метода приходится проверять «экспериментально»: начинают расчет и следят за поведением первых членов последовательности $\{x_n\}$. Если по ним видно, что процесс сходится, то расчет продолжают, пока не достигнут нужной точности. В противном случае вычисления прекращают и анализируют полученные данные, пытаясь установить причину расходимости и, в соответствии с ней, выбрать другой метод решения задачи.

Такая организация работы не связана с конкретной темой нашего разговора — численными методами решения уравнений. Она носит общий характер. В прикладной математике существует много численных методов, особенно относящихся к сложным задачам, которые пока не получили строгого обоснования, но успешно применяются на практике. Именно этот факт — основной аргумент в их пользу.

В заключение отметим, что центральная идея метода итераций — сжимающие отображения — является весьма общей. При незначительной модификации она может быть использована для изучения гораздо более сложных математических задач, чем уравнение (13). Для многих типов нелинейных уравнений принцип сжимающих отображений является, по существу, единственным методом их исследования и решения. Существенные обобщения допускает также метод Ньютона. Оба метода в своей общей форме играют важную роль в современной математике.

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

§ 1. От 10 пальцев к ЭВМ

Применение математических методов для решения практических задач неизбежно связано с проведением расчетов, с доведением ответа «до числа». Поэтому проблема упрощения и ускорения вычислений всегда имела первостепенное значение. Один из путей ее решения был связан с усовершенствованием методов счета. Самым важным результатом здесь явился переход от аддитивной *) (например римской) системы записи чисел к принятой в настоящее время позиционной системе.

В римском счислении MCXXXVI означает пятьсот + +сто + десять + десять + десять + пять + один. В ней с увеличением изображаемых чисел нужно неограниченно увеличивать число используемых символов. Однако главный недостаток аддитивной системы заключается в сложности выполнения арифметических операций при такой форме записи чисел. Это «искусство» требовало специальной профессиональной подготовки, которую в то время могли получить лишь немногие.

Позиционная система обладает по сравнению с аддитивной двумя существенными преимуществами.

Во-первых, в ней любое число записывается с помощью небольшого числа символов (в общепринятой десятичной системе ими являются десять арабских цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; в двоичной системе, которая используется в большинстве вычислительных машин, такими символами являются 0 и 1). В десятичной системе число MCXXXVI представляется в виде

$$636 = 6 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10 + 6,$$

*) Аддитивный (от латинского additivus — придаточный) — полученный путем сложения.

при этом один и тот же символ — цифра 6 — в зависимости от своего положения имеет разное значение: в одном случае он означает число сотен, в другом — число единиц.

Во-вторых, для позиционной системы правила выполнения арифметических операций намного проще, чем для аддитивной. Они сводятся к запоминанию таблиц сложения и умножения однозначных чисел.

Важное значение для упрощения вычислений сыграло также изобретение логарифмов. Вот что писал по этому поводу французский математик и астроном П. Лаплас, которому приходилось проводить большие расчеты в связи с астрономическими исследованиями: «Изобретение логарифмов, сокращая вычисления нескольких месяцев в труд нескольких дней, словно удваивает жизнь астронома».

Наряду с упрощением методов счета постоянно велись поиски путей ускорения процесса вычислений. Самым первым «техническим средством» в этой области стали 10 пальцев на руках человека. Они породили способ счета по пальцам и десятичную систему счисления. Многовековую историю имеют обычные канцелярские счеты, которые до сравнительно недавнего времени были обязательным атрибутом на столе у любого бухгалтера и кассира. Несколько поколений инженеров и научных работников широко пользовалось логарифмической линейкой для проведения простых, не требующих высокой точности расчетов.

В XVII в. начали появляться механические вычислительные машины, главная особенность которых состояла в том, что алгоритмы выполнения арифметических операций закладывались в само устройство. Их конструкция непрерывно совершенствовалась. В первой половине XX в. для проведения вычислений с многоразрядными числами широко использовались созданные по этому принципу ручные арифмометры и настольные клавишные машины, которые приводились в действие электромотором. При работе на таких машинах вычислителю было нужно набирать исходные данные на клавиатуре, записывать полученные результаты в специально приготовленную таблицу и следить за порядком выполнения арифметических операций, который определялся алгоритмом решения задачи. Сами же операции выполнялись машиной. Машина в несколько раз увеличивала скорость счета и существенно снижала нервное напряжение работника по сравнению со счетом вручную. Грубо это можно сравнить с ездой на лошади: и быстрее, чем пешком, и не так утомительно.

Однако развитие науки и техники в первой половине XX в., особенно в 30-е—40-е годы, существенно расширило круг прикладных задач, поставленных перед математикой. Их сложность не позволяла, как правило, получить ответ в явном виде и требовала применения численных методов. Для проведения расчетов стали создаваться специальные группы вычислителей. Объем вычислений и потребность в вычислителях резко нарастали. Стало ясно, что идти дальше по экстенсивному *) пути нельзя. Необходим был принципиально новый шаг, и этот шаг был сделан: появились ЭВМ.

Создание ЭВМ можно сравнить с самыми выдающимися достижениями — такими, как изобретение колеса, освоение выплавки металлов, создание паровой машины, освоение электричества, использование атомной энергии. Хорошо известна роль так называемых великих открытий в судьбе человечества: за сравнительно короткий срок они существенно изменяли производительные силы общества, оказывая большое влияние на условия его жизни.

Однако в этом ряду ЭВМ занимает особое место: если обычные машины расширяли физические возможности людей, то ЭВМ существенно повысили их интеллектуальный потенциал. Они способствовали развитию новых эффективных методов познания и использования законов природы, явились одним из наиболее важных факторов научно-технического прогресса последних десятилетий.

Далее мы коротко расскажем о принципах работы и основных этапах развития ЭВМ.

§ 2. Как работают ЭВМ

Для того чтобы ответить на этот вопрос, обсудим сначала, как работали вычислители, вооруженные клавишными машинами типа арифмометров, до появления ЭВМ.

Пусть нужно вычислить $\sqrt{a}=\sqrt{81\,725{,}3}$ (см. § 1 гл. 2). Вычислитель решает воспользоваться методом, основанным на рекуррентной формуле (2.3) **), выбрав за нулевое приближение $x_0=300$. После этого он заготовляет табл. 1.

Выполняя расчеты, вычислитель заполняет в таблице

*) Экстенсивный (от латинского extensivus — расширяющий, удлиняющий) — в противоположность интенсивному означает не качественное, а лишь количественное изменение.

**) Ссылка на формулу вида (2.3) означает, что ее надо искать в гл. 2 под номером (3).

строчку за строчкой, пока не получит результата требуемой точности (об этом можно судить либо по неравенству (2.9), либо просто по установлению нужного числа десятичных знаков у последовательности $\{x_n\}$).

Таблица 1

n	$\frac{a}{x_{n-1}}$	$x_{n-1}+\frac{a}{x_{n-1}}$	$x_n=x_{n-1}+\frac{a}{x_{n-1}}$
0			300
1			
2			
3			
4			

Приведем табл. 1 в заполненном виде после завершения вычислений (табл. 2). (В отличие от приведенных на с. 33, здесь результаты содержат не 12, а только 8 значащих цифр в соответствии с разрядностью клавишных машин.)

Таблица 2

n	$\frac{a}{x_{n-1}}$	$x_{n-1}+\frac{a}{x_{n-1}}$	$x_n=x_{n-1}+\frac{a}{x_{n-1}}$
0			300
1	272,41766	572,41766	286,20883
2	285,54429	571,75312	285,87656
3	285,87618	571,75274	285,87637
4	285,87637	571,75274	285,87637

Клавишные машины — это механические устройства. Считали они медленно: на выполнение одного действия уходило несколько секунд. Однако самым медленным звеном в вычислительном процессе была не машина, а человек. Основное время уходило не на счет, а на набор с помощью клавиш данных для очередной операции и на запись результатов в таблицу.

Принципиально новый шаг, который был сделан при создании ЭВМ, состоял в полной автоматизации вычислений, в их проведении без участия человека. Для этого нужно заранее описать в «понятной» для машины форме

всю последовательность операций, необходимую для решения задачи (такое описание называется *программой*), и задать исходные данные.

Чтобы программу и исходные данные можно было ввести в машину, выполнить необходимые вычисления и вывести полученные результаты, любая ЭВМ, независимо от ее конкретных конструктивных особенностей, должна иметь следующие узлы.

1) *Устройство управления* (УУ): управляет порядком выполнения операций, координирует работу всех узлов машины.

2) *Арифметико-логическое устройство* (АЛУ): служит для выполнения арифметических и логических операций.

3) *Запоминающее устройство* (ЗУ) или просто *память*: предназначено для хранения программы, исходных данных и результатов вычислений.

4) *Устройство ввода-вывода* (УВВ): используется для ввода в машину программы, исходных данных и вывода результатов счета, т. е. для обмена информацией между человеком и машиной.

Память ЭВМ разбита на отдельные перенумерованные ячейки. В каждую ячейку можно записать одно число. Номер ячейки называется ее *адресом*, хранимое в ней число — *машинным словом*. Одна часть машинных слов, находящихся во время работы ЭВМ в ее памяти, представляет собой «настоящие» числа, другая — команды программы. В условной, закодированной форме числа-команды определяют, из каких ячеек нужно взять данные, какую операцию над ними выполнить, в какую ячейку записать результат. С одним из вариантов записи команд мы познакомимся в конце параграфа.

Ячейки памяти состоят из элементов, в них помещаются отдельные разряды хранимого числа. Количество разрядов в ячейке задается конструктивными особенностями машины и одинаково для всех ячеек. Оно определяет длину машинного слова данной ЭВМ. Обычно в ЭВМ используется двоичная система счисления. В соответствии с этим элементы ячеек памяти могут находиться в одном из двух состояний (намагничено — не намагничено, есть ток — нет тока и т. д.). Одно из них интерпретируется как цифра 0, второе — как цифра 1. Проанализировав состояние всех элементов ячейки, можно прочитать помещенное в нее машинное слово. Меняя состояние элементов, мы заменим одно машинное слово другим.

Различают *оперативную (внутреннюю)* и *внешнюю память*. Разница между ними состоит в том, что УУ и АЛУ могут непосредственно получать и обрабатывать информацию, находящуюся только в оперативной памяти. Для работы с информацией, хранящейся во внешней памяти, ее нужно сначала поместить в оперативную память. Это осуществляется с помощью специальных команд.

Внешняя память современных ЭВМ состоит из магнитных лент, дисков, барабанов. Объем этих носителей в тысячи, десятки тысяч раз больше объема оперативной памяти. Однако для того, чтобы получить доступ к нужному элементу данных, расположенному во внешней памяти, его предварительно надо переслать в оперативную память, а эта операция занимает намного больше времени, чем прямое обращение в оперативную память.

Ввод программы и исходных данных в ЭВМ первоначально осуществлялся с помощью перфокарт. В настоящее время для этого используются также другие методы, о которых мы коротко расскажем в дальнейшем.

Перфокарты — это специальные картонные карты стандартных размеров и формы. Нужная информация наносится (перфорируется *)) на них в виде набора отверстий. Перфорация осуществляется заранее с помощью специального устройства — перфоратора, не связанного непосредственно с ЭВМ. Подготовленные перфокарты с отперфорнированной на них программой и исходными данными ставятся в читающее устройство ЭВМ, которое просматривает их одну за другой, прочитывает закодированную на них информацию и записывает ее в оперативную память. После того как программа и исходные данные введены, машина может приступать к вычислениям. Результаты расчетов, предписанные программой, печатаются на бумаге специальным печатающим устройством.

Отметим, что числа вводятся в ЭВМ и выводятся из нее на печать в привычной десятичной форме. Машина сама переводит их при вводе из десятичной системы в двоичную, а при выдаче на печать — из двоичной в десятичную. Пользователь ЭВМ может вообще ничего не знать ни о двоичной системе счисления, ни о том, что она используется для проведения вычислений в ЭВМ. Это никак не отразится на его работе.

---

*) Перфорировать (от латинского perforare — буравить) — пробивать отверстия, просверливать.

Устройство управления и арифметико-логическое устройство образуют единый комплекс, который называется *центральным процессором*. Центральный процессор и оперативная память составляют ядро ЭВМ. Все остальные элементы машины относятся к разряду *внешних устройств* или *периферийного оборудования*.

Теперь, когда мы познакомились с основными элементами ЭВМ и их назначением, приведем в качестве примера программу вычисления квадратного корня из положительного числа a с заданной точностью ε. При этом, как и в § 1 гл. 2, будем обозначать через x_0 нулевое приближение (за него можно принять, как мы знаем, любое положительное число) и через c_0 — какое-нибудь число, удовлетворяющее условию $0<c_0\leqslant\sqrt{a}$. Оно нужно для оценки достигнутой точности с помощью неравенства (2.9).

Программа вычисления $\sqrt{a}$

1) Введи числа a, ε, x_0, c_0 и переходи к следующей команде.

2) Присвой величине x значение x_0 и переходи к следующей команде.

3) Присвой величине y значение a/x и переходи к следующей команде.

4) Присвой величине y значение $x+y$ и переходи к следующей команде.

5) Присвой величине x значение $(1/2)y$ и переходи к следующей команде.

6) Присвой величине y значение x^2 и переходи к следующей команде.

7) Присвой величине y значение $y-a$ и переходи к следующей команде.

8) Присвой величине y значение y/c_0 и переходи к следующей команде.

9) Присвой величине δ значение $(1/2)y$ и переходи к следующей команде.

10) Сравни δ и ε. Если $\delta>\varepsilon$, то переходи к команде 3), иначе переходи к следующей команде.

11) Напечатай числа x, a, ε и переходи к следующей команде.

12) Прекрати вычисления.

Поясним составленную программу. Команда 2) помещает значение начального приближения x_0 в ячейку памяти, в которой хранятся значения переменной величины x (на каждом этапе вычислений в этой ячейке хранится зна-

чение x, равное значению одного из членов рекуррентной последовательности x_n).

Команды 3)—5) вычисляют по числу x число $(1/2)(x + a/x)$, т. е. делают очередную итерацию. Найденное число помещается в ячейку памяти, в которой хранится значение величин x, при этом старое значение переменной величины x теряется безвозвратно. Это значит, что если бы нам понадобилось старое значение переменной величины x, то для его восстановления нам бы пришлось провести все вычисления заново.

Команды 6)—9) вычисляют величину

$$\delta = \frac{x^2 - a}{2x},$$

с помощью которой оценивается сверху разность $x - \sqrt{a}$ (см. (2.9)).

Важное значение имеет команда 10). По этой команде не производятся вычисления, а сравниваются между собой вычисленное значение δ и заданная точность ε. По результату сравнения УУ «принимает решение», что делать дальше. Если $\delta > \varepsilon$, то УУ вернет вычислительный процесс к команде 3) и заставит делать еще одну итерацию. В противном случае, когда требуемая точность достигнута, машина напечатает полученный результат и прекратит вычисления по данной программе.

Заканчивая комментарии к программе, обратим ваше внимание на переменную y. Ей мы присваиваем результаты промежуточных вычислений, которые нужны только для выполнения следующей операции. Мы их не храним долго в памяти машины, а, использовав, тут же «затираем» результатом следующих вычислений. Такой подход позволяет экономить память машины, не загромождая ее ненужной информацией. Для данной задачи это не важно: она слишком проста, но для больших задач экономное распределение памяти машины имеет принципиальное значение, иначе задача в ней может не поместиться.

Теперь перейдем к обсуждению самого главного. Выше мы уже говорили, что программа должна определять последовательность вычислений в «понятной» для машины форме. Данная программа не удовлетворяет этому требованию: она записана в форме, понятной человеку, а не машине. Каждая машина имеет свой язык. Он определяется *системой команд*, т. е. набором операций, которые может выполнять машина, и способом их кодировки. Для каждой ЭВМ систе-

ма команд своя, так что *машинные языки* разных ЭВМ отличаются друг от друга. Однако общие принципы построения таких языков одинаковы, поэтому для первого знакомства достаточно рассмотреть язык конкретной ЭВМ.

Чтобы не касаться несущественных деталей, присущих конкретным ЭВМ, возьмем в качестве примера некоторую условную машину со следующей формой записи команд:

КОП A1 A2 A3

Здесь A1, A2 — адреса ячеек памяти, где хранятся числа, над которыми выполняется операция, A3 — адрес ячейки, в которую должен быть записан результат, КОП — код операции, выполняемой согласно данной команде. Все операции, которые «умеет» выполнять ЭВМ, перенумерованы. Числа, выражающие эти номера, называются *кодами операций*.

Приведем таблицу кодов некоторых операций нашей условной машины, нужных для записи программы вычисления $\sqrt{a}$ на машинном языке.

Таблица 3

КОП	Операция
00	Пересылка числа из ячейки A1 в ячейку A3, адрес A2 не используется
01	Сложение
02	Вычитание
03	Умножение
04	Деление
15	Сравнение чисел из ячеек A1 и A2 и передача управления на команду, расположенную в ячейке A3, если первое число больше второго (условная передача управления)

Согласно этой таблице команда

04 050 101 062

означает следующий приказ ЭВМ: возьми число из ячейки с адресом 050, раздели его на число из ячейки с адресом 101 и помести полученный результат в ячейку 062. Предположим, что эта команда хранится в ячейке 425; тогда, выполнив ее, машина перейдет к выполнению команды, которая хранится в ячейке 426.

Процедура последовательного выполнения команд программы конструктивно заложена в ЭВМ. Однако ее можно нарушить с помощью специальных операций передачи управления. В нашей машине такую возможность дает операция 15.

Рассмотрим в качестве примера команду

15 061 051 003

Она выполняется следующим образом: машина сравнивает между собой числа, которые хранятся в ячейках 061 и 051. Если первое число больше второго, то она переходит к выполнению команды из ячейки 003, в противном случае она будет выполнять команду из следующей ячейки.

После этих пояснений приведем программу вычисления $\sqrt{a}$ на языке нашей условной машины. Ради простоты мы не будем в ней явно описывать ввод в машину и вывод на печать нужных чисел, а ограничимся лишь основной частью программы, состоящей из команд 2) — 10). Дело в том, что ввод и вывод, которые должны сопровождаться переводом чисел из одной системы счисления в другую, представляют собой не элементарные операции, а достаточно сложные действия. Они описываются подпрограммами, состоящими из многих команд, и обсуждение этих подпрограмм увело бы нас в сторону от основных вопросов.

Итак, предположим, что числа a, ε, x_0, c_0 уже введены в машину, переведены в двоичную систему счисления и записаны в ячейки 050, 051, 052, 053. Предположим также, что в ячейке 060 записано двоичное представление числа 0,5. Значения переменных δ, y, x, которые вычисляются в процессе исполнения программы, будем помещать в ячейки 061, 062, 101.

Программа, которая вводится в ЭВМ и исполняется ею, приведена на следующей странице в среднем столбце, а левый и правый столбцы представляют собой лишь комментарий к ней. В левом столбце указаны номера ячеек, хранящих соответствующие команды, в правом — в символической форме описаны выполняемые операции.

В заключение отметим, что реально в памяти ЭВМ коды операций и адреса ячеек, которые фигурируют в командах, представлены в двоичной системе. Однако чтобы не усложнять чтение трудно воспринимаемыми двоичными числами, состоящими из длинных цепочек нулей и единиц, мы воспользовались привычной десятичной записью. Для понимания программы это не принципиально.

Программа вычисления $\sqrt{a}$, записанная на машинном языке

Адрес	Команда				Пояснения
	...				Ввод и перевод в двоичную систему счисления чисел a, ε, x_0, c_0
002	00	052	000	101	$x_0 \Rightarrow x$
003	04	050	101	062	$a/x \Rightarrow y$
004	01	101	062	062	$x+y \Rightarrow y$
005	03	060	062	101	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow x$
006	03	101	101	062	$x^2 \Rightarrow y$
007	02	062	050	062	$y-a \Rightarrow y$
008	04	062	053	062	$y/c_0 \Rightarrow y$
009	03	060	062	061	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow \delta$
010	15	061	051	003	Если $\delta > \varepsilon$, то перейти на команду из ячейки 003
	...				Перевод в десятичную систему счисления и печать чисел x, a, ε
	...				Останов

Составленная программа элементарна, однако она позволяет обсудить ряд специфических особенностей работы на ЭВМ.

1. Всякая ЭВМ, наряду с арифметическими операциями, может выполнять множество других операций. В частности, мы хотели бы обратить внимание на операцию условной передачи управления. Благодаря ей оказалось возможным оборвать бесконечный сходящийся процесс после достижения заданной точности. Такие операции имеются у любой ЭВМ. Они необходимы для решения задач, для которых алгоритм не может заранее однозначно предопределить весь ход вычислений. Вычислительный процесс допускает разветвления, причем выбор нужной ветви приходится «делать» самой машине во время исполнения программы на основании анализа получающихся результатов.

2. Благодаря тому, что алгоритм вычисления сводится к многократному применению рекуррентной формулы, число команд в программе намного меньше числа фактически выполняемых операций. Формула описана в программе только один раз. Это очень важное обстоятельство. Если бы нам пришлось писать программы, в которых число команд равно числу выполняемых операций, то применение ЭВМ оказалось бы практически бессмысленным: время, затраченное на создание и отладку программы, превышало

Процедура последовательного выполнения команд программы конструктивно заложена в ЭВМ. Однако ее можно нарушить с помощью специальных операций передачи управления. В нашей машине такую возможность дает операция 15.

Рассмотрим в качестве примера команду

15 061 051 003

Она выполняется следующим образом: машина сравнивает между собой числа, которые хранятся в ячейках 061 и 051. Если первое число больше второго, то она переходит к выполнению команды из ячейки 003, в противном случае она будет выполнять команду из следующей ячейки.

После этих пояснений приведем программу вычисления $\sqrt{a}$ на языке нашей условной машины. Ради простоты мы не будем в ней явно описывать ввод в машину и вывод на печать нужных чисел, а ограничимся лишь основной частью программы, состоящей из команд 2) — 10). Дело в том, что ввод и вывод, которые должны сопровождаться переводом чисел из одной системы счисления в другую, представляют собой не элементарные операции, а достаточно сложные действия. Они описываются подпрограммами, состоящими из многих команд, и обсуждение этих подпрограмм увело бы нас в сторону от основных вопросов.

Итак, предположим, что числа a, ε, x_0, c_0 уже введены в машину, переведены в двоичную систему счисления и записаны в ячейки 050, 051, 052, 053. Предположим также, что в ячейке 060 записано двоичное представление числа 0,5. Значения переменных δ, y, x, которые вычисляются в процессе исполнения программы, будем помещать в ячейки 061, 062, 101.

Программа, которая вводится в ЭВМ и исполняется ею, приведена на следующей странице в среднем столбце, а левый и правый столбцы представляют собой лишь комментарий к ней. В левом столбце указаны номера ячеек, хранящих соответствующие команды, в правом — в символической форме описаны выполняемые операции.

В заключение отметим, что реально в памяти ЭВМ коды операций и адреса ячеек, которые фигурируют в командах, представлены в двоичной системе. Однако чтобы не усложнять чтение трудно воспринимаемыми двоичными числами, состоящими из длинных цепочек нулей и единиц, мы воспользовались привычной десятичной записью. Для понимания программы это не принципиально.

Программа вычисления $\sqrt{a}$, записанная на машинном языке

Адрес	Команда	Пояснения
	...	Ввод и перевод в двоичную систему счисления чисел a, ε, x_0, c_0
002	00 052 000 101	$x_0 \Rightarrow x$
003	04 050 101 062	$a/x \Rightarrow y$
004	01 101 062 062	$x+y \Rightarrow y$
005	03 060 062 101	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow x$
006	03 101 101 062	$x^2 \Rightarrow y$
007	02 062 050 062	$y-a \Rightarrow y$
008	04 062 053 062	$y/c_0 \Rightarrow y$
009	03 060 062 061	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow \delta$
010	15 061 051 003	Если $\delta > \varepsilon$, то перейти на команду из ячейки 003
	...	Перевод в десятичную систему счисления и печать чисел x, a, ε
	...	Останов

Составленная программа элементарна, однако она позволяет обсудить ряд специфических особенностей работы на ЭВМ.

1. Всякая ЭВМ, наряду с арифметическими операциями, может выполнять множество других операций. В частности, мы хотели бы обратить внимание на операцию условной передачи управления. Благодаря ей оказалось возможным оборвать бесконечный сходящийся процесс после достижения заданной точности. Такие операции имеются у любой ЭВМ. Они необходимы для решения задач, для которых алгоритм не может заранее однозначно предопределить весь ход вычислений. Вычислительный процесс допускает разветвления, причем выбор нужной ветви приходится «делать» самой машине во время исполнения программы на основании анализа получающихся результатов.

2. Благодаря тому, что алгоритм вычисления сводится к многократному применению рекуррентной формулы, число команд в программе намного меньше числа фактически выполняемых операций. Формула описана в программе только один раз. Это очень важное обстоятельство. Если бы нам пришлось писать программы, в которых число команд равно числу выполняемых операций, то применение ЭВМ оказалось бы практически бессмысленным: время, затраченное на создание и отладку программы, превышало

бы время решения задачи вручную. Рекуррентные формулы, часто встречающиеся в алгоритмах решения различных задач, очень удобны для расчетов на ЭВМ.

3. Команды программы хранятся в памяти машины как обычные числа. Это дает возможность выполнять над ними различные операции, т. е. в ходе решения задачи программа может сама себя перестраивать: изменять в командах коды операций, адреса ячеек, из которых берутся или в которые засылаются данные, убирать одни и добавлять другие команды, менять команды местами и т. д. Все это с учетом возможностей команд передачи управления делает процедуру счета на ЭВМ очень гибкой. Не случайно в 50-х годах при появлении первых ЭВМ их называли вычислительными машинами с гибким программным управлением. Такое название правильно передает наиболее существенную особенность этих замечательных устройств.

§ 3. Поколения ЭВМ

Во введении и первых параграфах этой главы мы подчеркивали, что появление ЭВМ — не дело случая, а результат настойчивого поиска, стимулированного развитием науки и техники, потребностями практики.

Поиск средств автоматизации вычислений велся постоянно, так что многие идеи и принципы, использованные в современных ЭВМ, были высказаны и частично реализованы раньше в других вычислительных устройствах. Поэтому прежде чем обсуждать эволюцию ЭВМ, пути их совершенствования и перспективы дальнейшего развития, полезно, хотя бы очень коротко, рассказать предысторию. Идея создания вычислительных машин с программным управлением была высказана Ч. Бэббиджем (1791—1871 г.), профессором математики Кембриджского университета. Ч. Бэббидж занимался составлением навигационных таблиц, имевших важное значение для такой морской державы, как Великобритания. Внимательное изучение процедур вычислений привело его к мысли о возможности их автоматизации. Ч. Бэббидж разработал проект механического вычислительного автомата, названного им аналитической машиной, у которого были все основные узлы ЭВМ, включая принцип управления с помощью запоминаемой программы. Этот грандиозный проект, опередивший свое время, остался нереализованным.

Была создана только небольшая «разностная машина» со сравнительно простой и жестко заданной программой.. Труды Ч. Бэббиджа были опубликованы в 1888 г. после его смерти, и о них забыли. По достоинству его идеи были оценены значительно позже.

В 80-х годах прошлого века Г. Холлериз (США) для проведения переписи населения 1890 г. сконструировал машину, автоматизировавшую процесс обработки данных, и использовал в качестве носителей информации перфокарты. В 1896 г. он основал фирму по выпуску перфокарт и счетно-перфорационных машин. В дальнейшем она была преобразована в фирму IBM (International Business Mashines), которая является в настоящее время крупнейшим производителем ЭВМ.

В 1937 г. профессор университета штата Айова Дж. Атанасов с группой сотрудников начал работу по созданию ЭВМ. Принципиально новая идея Дж. Атанасова состояла в том, что вычислитель (арифметическое устройство) работал в двоичной системе. Были созданы специальные электромеханические блоки для перевода чисел из десятичной системы в двоичную и наоборот. Вторая мировая война не дала довести работу над проектом до конца.

Параллельно с Дж. Атанасовым работу над вычислительным автоматом вел в Гарвардском университете Г. Айткен. В 1937 г. им был предложен проект релейной электромеханической машины. Машина была построена фирмой IBM в 1944 г. и названа Марк-1. Она еще не имела гибко изменяющейся программы и по современным представлениям была очень медленной (операция умножения выполнялась за 3 с). Однако возможность создания автомата, состоящего из многих тысяч логических элементов, была доказана.

Примерно в то же время в Германии была создана вычислительная электромеханическая машина с программным управлением (машина К. Цузе).

В 1945 г. сотрудники Пенсильванского университета П. Эккерт и Дж. Моучли построили машину ENIAK. Это была ламповая машина, содержащая блоки на электронных реле. В отличие от Марк-1, ее можно назвать машиной с автоматическим программным управлением, хотя она еще не имела внутренней памяти.

В 1949 г. в Великобритании была построена машина EDSAC, которая уже обладала всеми необходимыми компонентами современных ЭВМ.

В 1947 г. была начата, а в 1951 г. завершена работа над первой советской ЭВМ, названной МЭСМ. Руководил ее созданием академик С. А. Лебедев.

Наступила эра ЭВМ. В 1954 г. во всем мире насчитывалось около 100 ЭВМ. В последующие годы их число нарастало стремительными темпами: 1965 г. — 40 тыс., 1974 г.— 215 тыс., 1978 г.— 580 тыс., 1983 г.— около 2 млн. Параллельно с ростом числа машин не менее быстро шел процесс их совершенствования. В зависимости от элементной базы центрального процессора и оперативной памяти, технических характеристик (быстродействия, объема памяти, системы команд) и сложности архитектуры принято делить ЭВМ на поколения.

В настоящее время насчитывается 4 поколения машин и уже просматриваются черты следующего, пятого поколения. Различие в технических возможностях ЭВМ разных поколений оказывало прямое воздействие на программное обеспечение и формы общения человека с вычислительной техникой. В настоящем параграфе мы расскажем о поколениях ЭВМ, не затрагивая вопросов их программного обеспечения, которым посвящена следующая глава книги.

Машины первого поколения. В качестве элементной базы центрального процессора ЭВМ первого поколения использовались электронные лампы, общее число которых доходило до нескольких десятков тысяч. Оперативная память строилась на блоках ферритовых сердечников. Использовались также для этой цели, особенно в первых ЭВМ, электронно-лучевые трубки, ртутные линии задержки и т. д. Такие ЭВМ потребляли значительную мощность — до 100 и более киловатт. Из серийных советских машин к первому поколению относятся Стрела (1953 г.), Урал (1954 г.), М-20 (1959 г.), Минск-1 (1960 г.), ряд машин серии БЭСМ.

Основными характеристиками ЭВМ являются быстродействие и объем оперативной памяти. Быстродействие оценивается как среднее число машинных операций, выполняемых за одну секунду. Объем оперативной памяти определяется числом машинных слов, длина машинного слова — числом двоичных разрядов или *битов*. Приведем в качестве примера характеристики одной из наиболее производительных машин первого поколения — машины М-20: быстродействие — 20 тыс. операций в секунду, длина машинного слова — 45 двоичных разрядов (45 бит), объем

оперативной памяти — 4К слов, где $К=2^{10}=1024$ — «двоичная тысяча».

Машина М-20 имела также внешнюю память, которая состояла из промежуточной памяти в виде 3 магнитных барабанов по 4К слов и 4 магнитофонов с емкостью магнитных лент по 75К слов. Скорость обмена информацией оперативной памяти с магнитными барабанами была сравнительно высокой, с магнитными лентами — медленной: требовалось несколько десятков секунд, а в «неблагоприятном» случае, когда для поиска нужной информации приходилось перематывать почти всю магнитную ленту,— несколько минут.

Быстродействие машины М-20 превышало скорость работы вычислителя с настольной клавишной машиной, равную примерно 2 операциям в минуту, в 600 000 раз. Чтобы получить представление об объеме ее памяти, воспользуемся следующими соображениями. В русском алфавите $32=2^5$ букв. Все буквы можно закодировать с помощью 5-разрядных двоичных чисел. В одном 45-разрядном машинном слове можно разместить 9 букв, а вся оперативная память вмещает $9\cdot 4096=36\,864$ буквы или 18 с лишним страниц текста, содержащего 2000 букв на странице (40 строк по 50 букв). Если дополнительно принять во внимание емкость 3 магнитных барабанов, то это число нужно учетверить.

Машины первого поколения имели относительно простую структуру и выполняли программы строго последовательно: центральный процессор переходил к новой команде только после того, как полностью оканчивал выполнение предыдущей. При таком режиме скорость работы ЭВМ существенно снижали «медленные» команды, связанные с обращением к внешним устройствам: магнитным лентам, печатающему устройству, вводу-выводу перфокарт и т. д. Скорость работы этого оборудования была на несколько порядков ниже скорости работы центрального процессора. Например, за время, в течение которого вводилась одна перфокарта, процессор мог выполнить около 10 тыс. арифметических и логических команд.

При работе на машинах первого поколения программист писал программу непосредственно на языке машины, самостоятельно распределяя ячейки оперативной памяти под программу, исходные данные, результаты счета. Разобраться в чужой программе без подробных пояснений автора об ее структуре и распределении памяти было практически

невозможно. Это сильно затрудняло обмен программами и особенно модификацию чужих программ.

Для машин первого поколения был характерен *открытый режим* их использования: программист приходил в отведенное ему время в машинный зал, садился за пульт ЭВМ и сам «пропускал» свою программу. Очень много времени и сил занимали «отладки» новых программ, т. е. выискивание и исправление ошибок, проверка программ с помощью пробных тестовых расчетов. Хотя результаты этих расчетов никакого практического интереса, как правило, не представляли (расчеты делались для контроля программы), они «съедали» до 50% дефицитного машинного времени.

В эпоху машин первого поколения, охватившую 50-е годы, началась разработка стандартных и типовых программ, составление библиотек программ на внешних носителях памяти с инструкциями по их использованию. Столкнувшись с типичной задачей или типичным элементом в большой задаче, математик мог прямо воспользоваться готовой программой.

Машины второго поколения. Переход к машинам второго поколения характеризовался прежде всего изменением элементной базы центрального процессора: на смену электронным лампам пришли транзисторы. Они работали более надежно, имели небольшие размеры, потребляли мало энергии и поэтому не так нагревались. Процессор стал более компактным.

Оперативная память по-прежнему строилась на ферритовых сердечниках, однако их размеры удалось существенно уменьшить (наружный диаметр сердечника был доведен до 0,45—1,0 мм). В результате скорость срабатывания устройства, зависящая от массы сердечника, возросла.

Технические возможности новой элементной базы в сочетании с опытом проектирования и эксплуатации машин первого поколения позволили сделать важный шаг в развитии вычислительной техники, повышении ее производительности. Расширилась система команд ЭВМ, усложнилась архитектура. Появилась возможность совмещать по времени некоторые операции, например работу центрального процессора и устройств ввода-вывода.

По своим параметрам машины второго поколения существенно превосходили машины первого поколения: они имели быстродействие порядка 10^4—10^5 операций в секунду и объем оперативной памяти (16—64)К слов. Улучши-

лись технические характеристики внешних запоминающих устройств, расширился парк устройств ввода-вывода.

Различных типов машин второго поколения было очень много. Из серийных отечественных ЭВМ к ним, например, относятся машины МИР, Минск-23, М-220, БЭСМ-4, Минск-32 и др. Ко второму поколению ЭВМ по своей элементной базе относится также машина высокой производительности БЭСМ-6, хотя ее архитектура уже отвечает следующему, третьему поколению ЭВМ.

Рассмотрим на примере ЭВМ БЭСМ-6, какие возможности скрывались за данной выше общей характеристикой машин второго поколения. БЭСМ-6, серийный выпуск которой начался в 1967 г., является одной из самых больших и совершенных машин второго поколения в мире. Ее быстродействие — 1 млн. операций в секунду (оно превышает указанные выше цифры «среднего» быстродействия машин второго поколения), оперативная память — 128К слов, длина слова — 48 бит. Таким образом, БЭСМ-6 в 50 раз быстрее машины М-20, а ее оперативная память примерно соответствует 1 200 000 буквам или книге в 600 страниц. Объем промежуточной памяти на магнитных барабанах — 512К, т. е. в 4 раза больше оперативной памяти. К центральному процессору могут быть подключены 32 магнитофона с емкостью каждой ленты до миллиона машинных слов. На такую ленту можно записать в закодированном виде 5 тыс. страниц текста, т. е. 10-томное издание. С 1972 г. в качестве промежуточной памяти стали также использовать магнитные диски, емкость которых значительно превышала емкость барабанов.

Емкость устройств внешней памяти принято измерять в машинных словах стандартной длины, содержащих 8 двоичных разрядов. Такую единицу называют *байтом*: 1 байт = =8 бит. Используются также более крупные единицы — *килобайт* (кб) и *мегабайт* (Мб): 1 кб=1024 байт, 1 Мб= =1024 кб. Измерение емкости памяти в стандартных единицах дает абсолютную характеристику устройства, не связанную с длиной машинного слова конкретной машины.

Емкость магнитных дисков в эпоху ЭВМ второго поколения составляла 1—30 Мб. На магнитном диске емкостью в 30 Мб можно хранить информацию, соответствующую примерно 15 тыс. страниц текста. На первый взгляд это очень много. Однако в вычислительной практике постоянно встречались задачи, для которых не хватало именно памяти.

центрального процессора, а не удобства пользователей. Одним из ее проявлений стал переход от открытого режима работы на ЭВМ к *закрытому режиму*: математиков-вычислителей «отлучили» от ЭВМ и перестали пускать в машинный зал. Задачи теперь пропускали операторы по инструкциям, составленным авторами программ.

Это новшество внедрялось в вычислительных центрах, как картошка на Руси, при яростном сопротивлении пользователей ЭВМ. Они доказывали, что без них задача считаться не будет, что операторы все перепутают (так, действительно, иногда бывало), что в инструкции нельзя оговорить всех тонкостей и т. д. Однако закрытый режим позволил более эффективно использовать вычислительную технику, существенно сократить непроизводительные потери машинного времени, и это предопределило исход борьбы: сопротивление пользователей было сломлено.

Преимущество закрытого режима состояло в том, что теперь на машине постоянно работали профессиональные операторы. Они знали пульт гораздо лучше большинства математиков-вычислителей, действовали более четко и грамотно, допускали меньше «операторского» брака. Пользователи, лишенные возможности присутствовать при прохождении своих задач через машину и вносить прямо на месте коррективы и исправления в программы, были вынуждены более внимательно готовить задания, заранее предусматривать возможные осложнения и отражать их в инструкциях операторам. Это также давало значительную экономию машинного времени.

Скоро инструкции операторам заменили инструкции самой машине в виде набора стандартных перфокарт, которые добавлялись к программе. Был введен режим *пакетной обработки*: программы собирались одна за другой и ставились в читающее устройство ЭВМ. Машина, закончив очередные расчеты, сама вводила следующую программу, границы которой выделялись специальными картами, и приступала к ее решению. Операторам оставалось только контролировать работу ЭВМ и следить за тем, чтобы ее читающее устройство не пустовало.

Этот комплекс технических и организационных мер существенно повысил эффективность использования вычислительной техники.

Машины третьего поколения. Совершенствование технологии производства полупроводников привело к созданию микроэлектронных устройств, получивших название

интегральных схем. Интегральная схема представляет собой тонкую пластинку химически чистого кристаллического полупроводникового материала (чаще всего кремния) размером около 1 см². На поверхности такого кристалла в результате очень сложного многоэтапного процесса создается многослойная миниатюрная электронная схема, содержащая все необходимые транзисторы, диоды, сопротивления и соединения между ними. Схема помещается в пластмассовый или керамический защитный корпус, снабженный несколькими десятками тонких металлических ножек, так что вся конструкция по внешнему виду напоминает многоногого паука.

В зависимости от числа электронных компонент, смонтированных на одном кристалле, различают малые интегральные схемы (до 100 элементов на кристалл), средние (до 1000 элементов на кристалл) и большие интегральные схемы (БИС), которые могут насчитывать несколько десятков тысяч электронных компонент. В последнее время все большее распространение получают сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), на кристалле которых размещены сотни тысяч сверхминиатюрных электронных приборов и соединений между ними. Под микроскопом кристалл СБИС напоминает план большого города с домами, улицами и площадями.

Использование интегральных схем вместо отдельных транзисторов позволило значительно уменьшить габариты узлов ЭВМ, повысить их экономичность и надежность. Достоинства интегральных схем при конструировании сложных электронных устройств стимулировали их непрерывное совершенствование. За последние 20 лет ежегодно происходило примерное удвоение числа электронных компонент, которые размещались на одном кристалле. Соответственно уменьшались размеры отдельных транзисторов и соединений между ними. Сейчас эти размеры удалось довести до нескольких микрон.

Интегральные схемы стали элементной базой центральных процессоров машин третьего поколения. Они используются также в этих машинах в качестве элементной базы оперативной памяти, вытесняя постепенно память на ферритовых сердечниках. Широкое применение в вычислительной технике интегральных схем открыло новые возможности для ее совершенствования, повышения быстродействия до 10^6—10^7 операций в секунду, расширения оперативной памяти до нескольких мегабайт.

Такие задачи стимулировали настойчивые поиски путей повышения емкости запоминающих устройств.

Машины второго поколения обладали более развитой и совершенной системой ввода-вывода. Появились быстродействующие читающие устройства, способные пропускать до 1000 перфокарт в минуту, алфавитно-цифровые печатающие устройства (АЦПУ), графопостроители. АЦПУ дали возможность гибко менять форму выдачи результатов, например, печатать их в виде таблиц со словесным описанием приведенных величин. Все это существенно облегчило обработку результатов расчетов.

Повышение технических характеристик машин второго поколения, особенно таких как БЭСМ-6, расширило возможности их применения, позволило решать большие и сложные задачи. Однако усложнение задач неизбежно связано с усложнением программ. Программирование и отладка грозили стать самым «узким» местом, снижающим эффективность использования ЭВМ. Возникла проблема дальнейшей автоматизации, включения в нее не только вычислительного процесса, но также процесса создания и отладки программ. Важное значение для решения этой проблемы имел переход от программирования на языке машин к программированию на *алгоритмических языках*.

Первые алгоритмические языки появились в конце 50-х — начале 60-х годов. В качестве примера можно привести алгол-60, название которого является сокращением английских слов Algorithmic Language (алгоритмический язык), а число 60 указывает год его появления — 1960. В отличие от машинных языков ЭВМ с их трудно воспринимаемой цифровой формой записи команд, алгоритмические языки более наглядны. Они используют привычную математическую символику и другие легко воспринимаемые изобразительные средства. Фразы этих языков состоят из нужных формул, записанных в обычном, понятном любому математику виде, и из нескольких стандартных терминов на английском языке. Важным достоинством алгоритмических языков является их универсальность и наличие международного стандарта, они совершенно не зависят от конкретного типа машины, для которой предназначена написанная программа. Программист, работающий на алгоритмическом языке, может вообще не знать систему команд машины, ему не нужно переучиваться при переходе с одной машины на другую.

Для того чтобы программа, написанная на алгоритмическом языке, могла быть выполнена ЭВМ, она должна быть сначала переведена с этого универсального языка на собственный язык машины. Делает это сама ЭВМ с помощью специальной программы — *транслятора* *). Транслятор проводит логический анализ программ, написанных на алгоритмическом языке, и осуществляет их перевод на язык машины. Транслятор — очень сложная программа, его создание — большая работа, которую проводит группа высококвалифицированных специалистов по системному программированию. Однако важно подчеркнуть, что обычные пользователи ЭВМ могут ничего не знать ни о самом трансляторе, ни о принципах его работы. Это не помешает им писать программы на алгоритмическом языке и проводить по ним расчеты. Более подробно об алгоритмических языках и трансляторах будет рассказано в § 2 следующей главы.

Итак, в эпоху ЭВМ второго поколения в развитии вычислительной техники, в повышении ее быстродействия и эффективности был достигнут значительный прогресс. Он сопровождался быстрым увеличением общего числа ЭВМ. Однако рост потребностей в вычислительной технике шел еще более быстрыми темпами, опережая возможности ее производства. Вызвано это было расширением сферы применения ЭВМ, увеличением числа пользователей, существенным усложнением решаемых задач. Машинное время, которое было дефицитным в эпоху машин первого поколения, стало еще более дефицитным.

Одно из слабых мест ЭВМ первого и отчасти второго поколения состояло в том, что при вводе и выводе данных, т. е. при «общении» машины с человеком, она не считала, ее «мозг» — центральный процессор — бездействовал, а работало только периферийное оборудование. Механические устройства ввода и вывода, несмотря на существенные усовершенствования, не могли угнаться за быстродействием электронного центрального процессора, и потери его рабочего времени от простоев при вводе и выводе данных были значительными.

Жертвой этого конфликта в условиях острого и постоянно растущего дефицита машинного времени, его высокой стоимости, оказался человек. Началась жесткая борьба за сокращение «контактов» пользователей с машиной, в которой на первое место ставились «интересы» машины, ее

*) Транслятор (по-английски — translator) — переводчик.

В эпоху ЭВМ второго поколения появилось очень много различных типов машин, которые имели близкие характеристики, но отличались системой команд и способом их кодировки. Для каждой из них приходилось разрабатывать свое математическое обеспечение: трансляторы с алгоритмических языков, библиотеку стандартных программ и т. д. Стоимость математического обеспечения быстро росла и нередко стала превышать стоимость самих машин. Это явилось одной из причин, по которой машины третьего поколения, обладающие еще более сложным математическим обеспечением, стали разрабатывать не поодиночке, а семействами. ЭВМ одного семейства могли отличаться быстродействием, объемом памяти, однако все они являлись конструктивно, программно, информационно совместимыми и обладали одинаковым математическим обеспечением. Это существенно снижало расходы на разработку математического обеспечения и предоставляло широкие возможности для наиболее экономного, эффективного использования вычислительной техники в зависимости от характера решаемых задач.

Одним из примеров такого семейства является единая система электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ) третьего поколения, которая создается и выпускается в рамках международного сотрудничества социалистических стран — участниц СЭВ по многостороннему соглашению, подписанному в декабре 1969 г. Выпуск машин единой системы начался в 1972 г. Их вместе с периферийным оборудованием производили и поставляли друг другу страны — участницы соглашения. Осуществление в короткий срок такого крупного проекта явилось претворением в жизнь принципов экономической интеграции социалистических стран, лежащей в основе деятельности СЭВ.

В последующие годы начался выпуск модифицированных моделей ЕС ЭВМ. В настоящее время в рамках единой системы насчитывается около 20 ЭВМ и свыше 200 различных устройств периферийного оборудования, каждое из которых совместимо с любой машиной системы. В единой системе приняты международные стандарты на технические характеристики всех устройств и узлов ЭВМ, на систему кодов, операций, средств программирования. ЭВМ единой системы совместимы с моделями ЭВМ ряда капиталистических стран, например крупнейшей американской фирмы IBM. Это открывает возможности для широкого международного сотрудничества в области использо-

вания вычислительной техники и обмена программным обеспечением.

При разработке машин третьего поколения был учтен богатый опыт эксплуатации ЭВМ второго поколения со всеми их достоинствами и недостатками. Достоинства старались развить дальше, а недостатки — устранить. В результате новые машины отличались от своих предшественниц не только элементной базой, быстродействием, объемом памяти. Они предоставляли пользователям гораздо больше возможностей и удобств в работе, существенно изменяли стиль использования вычислительной техники.

Мы уже отмечали, что для машин первого поколения был характерен открытый режим эксплуатации. В эпоху машин второго поколения он сменился закрытым режимом. Для машин третьего поколения типичной стала работа в *мультипрограммном режиме с разделением времени*, при котором ЭВМ одновременно обслуживала несколько пользователей. Достигнуто это было как за счет конструктивных особенностей машин, так и благодаря созданию специального математического обеспечения.

К конструктивным особенностям прежде всего нужно отнести то, что в третьем поколении ЭВМ было окончательно закреплено разделение машин на отдельные независимые модули: центральный процессор и специальные процессоры для управления устройствами ввода и вывода, названные *каналами ввода-вывода*. Такое разделение является основой мультипрограммного режима, при котором машина работает сразу с несколькими программами и наиболее полно использует возможности своего центрального процессора. Пока центральный процессор проводит расчеты по одной из программ, каналы и подключенные к ним периферийные устройства печатают полученные ранее результаты, вводят и подготавливают к исполнению следующие программы. Закончив очередной этап расчетов, центральный процессор сразу переключается на следующую программу, передав выдачу результатов одному из свободных каналов выдачи.

Режим разделения времени — это особая форма мультипрограммного режима, при котором ЭВМ работает сразу с несколькими пользователями, считая их задачи по очереди малыми порциями. Возможность организации такого обслуживания потребовала существенного усложнения аппаратуры и математического обеспечения ЭВМ. Пришлось решать вопросы распределения оперативной памяти между

различными программами, защиты каждой из них от «вмешательства» со стороны остальных программ, создания системы прерывания, которая осуществляет автоматическое переключение машины с одной программы на другую. Были разработаны специальные операционные системы, обеспечивающие согласованные действия всех модулей ЭВМ. Коротко о них будет рассказано в § 4 следующей главы.

Обычно при работе в режиме разделения времени пользователи связываются с ЭВМ с выносных терминалов *), которые стоят либо в их рабочих комнатах, либо в специально оборудованных помещениях. Вооруженный терминалом, пользователь может ввести в машину свою программу или (это бывает гораздо чаще) вызвать ее с внешнего носителя памяти и произвести нужные расчеты. Получив результаты и ознакомившись с ними, он имеет возможность внести изменения в программу, в исходные данные и продолжить вычисления. При таком режиме пользователь работает с ЭВМ в форме диалога. Если бы он ничего не знал о существовании других терминалов, за которыми одновременно с ним ведут расчеты другие пользователи, то у него была бы иллюзия того, что машина находится в его личном распоряжении.

Так спираль развития вычислительной техники и ее использования человеком завершила очередной виток: математики-вычислители, попавшие «в опалу» в эпоху машин второго поколения, были реабилитированы. Они снова получили прямой доступ к ЭВМ, только теперь и сами машины, и форма связи с ними существенно изменились. Математику не нужно было больше идти в машинный зал, машина сама пришла в его рабочее помещение через выносной терминал. Существенное расширение контактов с машиной и изменение их формы потребовали создания нового периферийного оборудования.

Широкое распространение получили телетайпы, которыми начали пользоваться еще в эпоху машин второго поколения. Они применяются в машинных залах для связи операторов с ЭВМ и в качестве выносных терминалов для пользователей. Телетайп — это электромеханическое устройство, аналогичное телеграфному аппарату, который можно увидеть в любом почтовом отделении. Буквенный и

*) *Выносной терминал* (от латинского terminus — конец, предел) — устройство ввода-вывода, расположенное вне машинного зала.

цифровой текст набирают на клавиатуре пишущей машинки телетайпа. Он печатается на бумаге и одновременно в закодированном виде (как телеграмма) посылается по кабелю в ЭВМ. Машина может отвечать на вопросы, заданные ей через телетайп, выдавать результаты расчетов. Ее ответы будут восприняты устройством, декодированы и отпечатаны пишущей машинкой.

Большие удобства пользователям предоставляет терминальное устройство с электронно-лучевой трубкой, получившее название дисплея *). Дисплеи имеют клавиатуру, и с них, как и с телетайпов, можно вводить программу и данные в ЭВМ, только в этом случае набранный текст не печатается, а высвечивается на экране. Информация, которая выводится из машины, также подается на экран. Она может иметь форму либо алфавитно-цифрового текста, либо графического материала. Это делает работу с дисплеем особенно удобной, поскольку позволяет представить результаты расчетов не только в виде таблиц, но и в виде графиков, наглядность которых существенно упрощает последующий анализ.

При моделировании на ЭВМ сложного объекта появляется возможность увидеть на экране дисплея его поведение и, в случае необходимости, снять с экрана на кинопленку. Такие кинофильмы стали одним из распространенных способов представления результатов расчета.

Комбинация фотоэлемента и электронно-лучевой трубки дисплея используется в качестве прямого устройства ввода в ЭВМ информации, зафиксированной на фотопленке. Пленка помещается между трубкой и фотоэлементом. Когда луч пробегает экран, фотоэлемент фиксирует точки экрана, которые оказались скрытыми непрозрачными участками пленки. Информация о почернении пленки преобразуется в числовую информацию и вводится в ЭВМ. Такие устройства оказались спасением для физиков: они позволили автоматизировать обработку огромного числа (десятки, сотни тысяч) фотографий треков частиц в пузырьковых камерах.

Дисплеи предоставляют очень широкие возможности для работы с машиной в форме диалога. Они непрерывно совершенствуются: появились цветные дисплеи, а также дисплеи с собственным процессором и памятью, получившие название «интеллектуальных» дисплеев.

---

*) Дисплей (по-английски — display) — показ, выставление напоказ, выставка.

Машины четвертого поколения. Машины четвертого поколения — это новый шаг в развитии вычислительной техники. Их быстродействие доведено до 10^7—10^8 операций в секунду. Такая высокая скорость работы достигнута в первую очередь за счет распараллеливания вычислений: центральный процессор этих ЭВМ состоит из нескольких независимых блоков, которые могут одновременно выполнять большое число операций. Еще более высокую производительность имеют специализированные процессоры, приспособленные для выполнения векторных и матричных операций над массивами чисел. В задачах, содержащих много операций подобного типа, быстродействие специализированных процессоров может доходить до 10^9 операций в секунду.

Элементной базой машин четвертого поколения являются БИС и СБИС. Их применение позволило создать мощные, наделенные широкими возможностями процессоры, увеличить объем оперативной памяти и в то же время уменьшить размеры машин. Последнее обстоятельство имеет важное значение не только для удобного, компактного размещения вычислительной аппаратуры, но и для ее быстродействия. Действительно, сигнал, распространяющийся со скоростью света, проходит 3 м за время $t=10^{-8}$ с. Если бы машина выполняла все операции строго последовательно и после каждой операции пересылала информацию на расстояние порядка 3 м, то поднять ее быстродействие выше 10^8 операций в секунду было бы принципиально невозможно. По-видимому, в недалеком будущем центральные процессоры мощных, сверхбыстрых ЭВМ будут иметь размеры порядка десятка сантиметров.

Большие успехи достигнуты в области совершенствования периферийного оборудования, особенно внешних запоминающих устройств большой емкости. Созданы магнитные диски емкостью в тысячи мегабайт. Поперечная плотность записи на них доведена до нескольких десятков дорожек на 1 мм. Для сравнения укажем, что в кассетных магнитофонах на ленте шириной порядка 4 мм располагается от 2 до 4 дорожек, на долгоиграющих пластинках записывается около 10 дорожек на 1 мм.

Существенные изменения претерпевает программирование для машин четвертого поколения. Новые входные языки предоставляют возможности для описания сложных структур данных, для параллельной обработки информации. Много внимания уделяется повышению производительности

труда программистов. Разрабатываются специальные комплексы по производству программного продукта по принципам промышленного производства. Создаются ЭВМ с нетрадиционной структурой и схемой работы: потоковые ЭВМ, однородные вычислительные среды, ЭВМ с программно-перестраиваемой структурой и др.

Машины четвертого поколения принесли новую технологию использования вычислительной техники: ЭВМ стали объединять в комплексы и сети. *Вычислительный комплекс* строится на базе нескольких территориально близко расположенных ЭВМ. Он может состоять как из одинаковых, так и из разных машин. В первом случае говорят об *однородном* вычислительном комплексе, во втором — о *неоднородном*.

Создание однородных вычислительных комплексов повышает мощность и надежность: в этом случае выход из строя отдельных машин снижает производительность комплекса, но не лишает его работоспособности. Обычно ЭВМ, включенные в комплекс, имеют либо общую оперативную память *(многопроцессорные системы)*, либо общее поле внешних устройств.

Неоднородные вычислительные комплексы создаются на базе разных ЭВМ. Каждая из них имеет свою архитектуру, систему команд и выполняет в рамках комплекса определенные функции. Главные ЭВМ обеспечивают исполнение программ пользователей, процессоры ввода-вывода отвечают за работу внешних устройств, связные процессоры осуществляют связь комплекса с более широким объединением — сетью ЭВМ. В состав комплекса могут также входить специализированные ЭВМ, ориентированные на быстрое выполнение операций над векторами и матрицами.

На вычислительных комплексах реализуется распределение обработки данных: несколько программ обрабатывается параллельно, и каждая из них одновременно загружает работой несколько машин и устройств ввода-вывода.

Вычислительные комплексы и отдельные машины объединяются в более крупные системы — *сети ЭВМ*. Сети могут быть очень разветвленными и охватывать машины, отстоящие друг от друга на тысячи километров. В узлах сетей находятся мощные комплексы, предназначенные для организации «коммунального» обслуживания пользователей. Узлы соединяются между собой высокоскоростными ли-

ниями связи, на пересечении которых находятся связные ЭВМ. Пользователи входят в сеть через специальные ЭВМ — концентраторы терминалов. К каждому такому концентратору подключаются их терминалы или персональные компьютеры. Когда абоненту вычислительной сети не хватает производительности своих вычислительных средств, он посылает программу для проведения расчетов в мощные узловые вычислительные комплексы.

Кроме обслуживания вычислительными мощностями, сеть предоставляет своим абонентам еще один вид обслуживания — информационный. Абонент получает доступ к банкам данных, содержащим сведения самого различного характера, которые было бы невозможно собрать в каком-нибудь одном вычислительном центре.

Развитие системы коммунального обслуживания вычислительными и информационными услугами требует не только совершенствования аппаратурного и программного обеспечения ЭВМ, но и решения многих других проблем. Некоторые из них выходят на общегосударственный уровень.

К таким проблемам в первую очередь относится развитие средств связи, пригодных для использования в вычислительном деле: телефонных и телеграфных каналов, спутниковой связи, волоконнооптических линий и т. д. Решение проблемы связи необходимо для еще более широкого и эффективного использования вычислительной техники в различных областях человеческой деятельности: в науке, на производстве, в культуре и образовании.

§ 4. Мини- и микрокомпьютеры

Первоначально развитие вычислительной техники шло только в направлении неуклонного увеличения мощности и сложности машин. Однако в середине 60-х годов, когда стало абсолютно ясно, что область возможного применения ЭВМ далеко выходит за рамки быстродействующего вычислительного автомата, в развитии вычислительной техники появилось новое направление. Дело в том, что использование ЭВМ в «невычислительной» сфере (управление производственными процессами или сложными научными экспериментами, контроль качества продукции, обработка текстов и т. д.) предъявляет к ним специфические требования. Во многих случаях на первое место выдвигается не быстродействие, объем памяти, длина машинного слова, опреде-

ляющая точность, а надежность, простота технического обслуживания, низкая стоимость. Потребность в вычислительной технике специального типа привела к появлению *миникомпьютеров* — ЭВМ с укороченным машинным словом, ограниченным набором команд и небольшой оперативной памятью.

Чтобы характер этого новшества в развитии вычислительной техники стал более ясным, приведем некоторые данные первого миникомпьютера PDP-5. Он был разработан в 1963 г. американской фирмой DEC (Digital Equipment Corporation) для управления ядерными реакторами и имел длину машинного слова 12 бит, оперативную память — 4К=4096 слов, простую систему команд, которая включала единственную арифметическую команду — сложение целых чисел. Ценой таких жестких ограничений удалось создать небольшую настольную машину, экономичную в отношении энергопотребления, высоконадежную, дешевую, с минимальными требованиями к техническому обслуживанию (на уровне бытового телевизора). В то же время необходимо подчеркнуть, что, в отличие от специализированных управляющих устройств с «запаянной» логикой, это была программируемая ЭВМ. Поэтому сфера ее применения не ограничилась реакторами, для которых она создавалась. Машина получила широкое распространение и использовалась в качестве управляющей и контролирующей в самых различных областях.

Миникомпьютер PDP-5 и созданная на его основе модель PDP-8 (1965 г.) положили начало серийному производству и массовому распространению новых машин. Их выпуск нарастал лавинообразно. По мере роста производства увеличивалась степень его автоматизации на базе самих же миникомпьютеров, улучшались технические характеристики, снижалась цена. Низкая стоимость, простота эксплуатации позволили использовать миникомпьютеры там, где применение обычных макрокомпьютеров было бы либо невозможно, либо экономически нецелесообразно.

В СССР серийно выпускаются миникомпьютеры СМ-3 и СМ-4. Они имеют 16-разрядное машинное слово, что является в настоящее время общепринятым стандартом для миникомпьютеров. Быстродействие машины СМ-4 измеряется сотнями тысяч операций в секунду, объем оперативной памяти — 124К слов. В качестве внешней памяти к СМ-4 может быть подключено до 8 магнитных дисков емкостью

по 5 Мб. Машины СМ-3 и СМ-4 программно совместимы как между собой, так и с получившими широкое распространение машинами семейства PDP-11 фирмы DEC.

Миникомпьютеры хорошо адаптируются к работе в самых разных условиях, и сегодня можно указать множество «освоенных ими специальностей». Они используются в качестве встроенных управляющих машин в сложных приборах, механизмах, станках, на автоматических производственных линиях. Миникомпьютерами оснащаются научные лаборатории и медицинские учреждения. Они находятся на борту самолетов и космических ракет. Миникомпьютеры работают в автоматизированных системах обработки текстов, в обучающих и контролирующих системах. Устройство миникомпьютеров позволяет в случае необходимости подключать дополнительное оборудование, наращивать мощность, переходить от единичных машин к миникомпьютерным системам. Введение дисков и терминалов создает хорошие условия для интерактивной обработки информации. Добавление аналого-цифровых преобразователей и мультиплексеров обеспечивает возможность сбора данных в режиме реального времени в автоматизированных экспериментах. Доукомплектование блоком «расширенной арифметики» и дополнительными блоками памяти позволяет успешно использовать миникомпьютеры для решения вычислительных задач.

По мере расширения сферы использования миникомпьютеров создавалось соответствующее математическое обеспечение: операционные системы, системы программирования, библиотеки и пакеты прикладных программ. Обычно типовое математическое обеспечение миникомпьютера включает несколько операционных систем (дисковую, разделения времени, реального времени), системы программирования на языках ассемблер, бейсик, фортран, паскаль, а также на некоторых специальных языках, приспособленных для управления процессами в режиме реального времени и для планово-экономических расчетов. Развитые библиотеки и пакеты для миникомпьютеров содержат сотни прикладных программ разного назначения.

Элементной базой миникомпьютеров являются интегральные схемы со степенью интеграции от 10—20 до 100—200 транзисторов на одном кристалле. Переход к БИС позволил сделать следующий шаг в развитии миниатюрной вычислительной техники: появилась возможность выполнить в виде одной БИС целый процессор. Такие процессоры

получили название *микропроцессоров*, а созданные на их основе ЭВМ — *микрокомпьютеров*. Остальные элементы микрокомпьютеров (оперативная память, устройства сопряжения с периферийным оборудованием) также реализуются в виде БИС. Все это размещается на одной или нескольких печатных платах. Имеются даже *однокристальные микрокомпьютеры*, выполненные целиком в виде одной БИС. Микрокомпьютер вместе с подключенным к нему периферийным оборудованием образует *микрокомпьютерную систему*.

Микрокомпьютеры в своем развитии повторили путь миникомпьютеров, только сделали это в более быстром темпе. Первые микрокомпьютеры появились в начале 70-х годов на базе 4-разрядного микропроцессора. Вскоре после этого были созданы 8-разрядные микрокомпьютеры. К началу 80-х годов выпуск 8-разрядных микрокомпьютеров исчислялся миллионами штук в год, 4-разрядных — десятками миллионов. Прогрессирующая технология производства БИС позволила довести число транзисторов на одном кристалле до десятков тысяч. В результате появилась возможность создать 16-разрядные микрокомпьютеры, которые по всем параметрам превосходят миникомпьютеры при меньшей стоимости, большей надежности и практически неограниченной возможности тиражирования. В настоящее время идет процесс постепенного вытеснения миникомпьютеров микрокомпьютерами. В СССР выпускаются серии микрокомпьютеров Электроника-60, Электроника НЦ-80 и др. Они программно совместимы между собой и с миникомпьютерами СМ-3, СМ-4.

Успехи новой техники небывало расширили применение ЭВМ как эффективного средства управления и автоматизации. Особенно широко мини- и микрокомпьютеры используются в качестве элементов, встроенных для этой цели в сложные приборы, механизмы, станки. Однако в сфере решения вычислительных задач они пока коренных изменений не принесли. Причина заключается в том, что вычислительные мощности малых машин ограничены, а операционные системы не могут обеспечить тех удобств, которые предоставляют пользователям операционные системы больших ЭВМ.

В середине 70-х годов в развитии микрокомпьютеров наметилась новая тенденция, связанная с появлением так называемых *персональных компьютеров*. Персональный компьютер — это микрокомпьютерная система, оформленная

ГЛАВА 4

ПРОГРАММИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭВМ

§ 1. Прикладное и системное программирование

Первые ЭВМ поставлялись в вычислительные центры заводами-изготовителями в «голом» виде, без какого-либо вспомогательного программного обеспечения. Поэтому все операции, которые нужно было выполнить ЭВМ для решения задачи, математику-прикладнику приходилось полностью описывать в своей программе. Кроме того, при открытом режиме эксплуатации вычислительной техники он, как правило, сам работал за пультом в качестве оператора ЭВМ, пропуская программу в процессе ее отладки или счета. Все это занимало массу непроизводительно затраченного времени и требовало широкой специальной подготовки, которой в ту пору обладали немногие.

Однако очень скоро было осознано, что значительную часть вспомогательной, рутинной работы, связанной с использованием ЭВМ, можно переложить на машины. Для этого нужно заранее написать соответствующие программы, а затем использовать их каждый раз, когда в этом возникает необходимость. Например, можно составить программы для перевода чисел из десятичной системы счисления в двоичную и наоборот с тем, чтобы использовать их при вводе и выводе чисел. В результате пользователь ЭВМ получит возможность иметь дело только с числами, записанными в привычной десятичной системе, совершенно не «соприкасаясь» с двоичными числами, с которыми оперирует ЭВМ. Можно разработать программу, считывающую и воспринимающую тексты-приказы с операторского терминала. Такая программа позволит перейти от управления работой ЭВМ с помощью кнопок и тумблеров на пульте к более простой и удобной форме управления с помощью словесных

приказов. При наличии большого развитого комплекса таких вспомогательных программ работа на ЭВМ существенно упрощается как для программистов, так и для персонала, обслуживающего машину.

Мы уже говорили в предыдущей главе о том, что открытый режим эксплуатации ЭВМ просуществовал сравнительно недолго. На смену ему пришел закрытый режим: пользователей перестали пускать в машинные залы, а всю работу на ЭВМ поручили специальным группам операторов. Что касается программирования, то его развитие пошло дальше по двум направлениям. Первое из них — *прикладное программирование*, связанное с разработкой программ для решения конкретных научно-технических задач (моделирование физического процесса, вычисление траектории спутника, расчет инженерной конструкции, управление технологическим процессом и т. д.). Людей, разрабатывающих такие программы, обычно называют *прикладными программистами*. Среди них можно встретить как профессиональных специалистов по вычислительной математике, так и физиков, инженеров, экономистов, которые обладают навыками программирования и знакомы с использованием ЭВМ в своей области знаний.

Второе направление в программировании принято называть *системным программированием*. В его задачу входит разработка специальных программ, автоматизирующих процесс написания и отладки прикладных программ, обеспечивающих эффективное использование ЭВМ при их исполнении. Совокупность таких вспомогательных программ называется *математическим* или *программным обеспечением ЭВМ*, а разработчики этих программ — *системными программистами*.

Прикладные программы являются конечной целью программирования. Если сравнить их создание с изготовлением товаров народного потребления (продуктов питания, одежды, обуви, мебели), то системное программирование будет играть роль производства средств производства (машин, станков, инструментов и т. д.).

В настоящее время ни одна ЭВМ не поставляется заводом-изготовителем без математического обеспечения. При этом в комплексе «аппаратура + математическое обеспечение», называемом *вычислительной системой*, непрерывно возрастает ведущая роль второго компонента. Именно в математическом обеспечении заключается главное богатство современных ЭВМ. Характерно, что затраты на его

в виде единого, компактного прибора. Он предоставляет своему хозяину широкий комплекс технических средств, необходимых для разработки, отладки и выполнения программ. Ориентация на одного пользователя существенно упрощает операционную систему и другое программное оснащение, обеспечивает достаточно высокий уровень вычислительного сервиса.

В настоящее время имеется несколько разновидностей персональных компьютеров, различающихся по назначению, возможностям, цене. Простейшие, так называемые «домашние» компьютеры, предназначены в первую очередь для программируемых игр. Они оформлены в виде прибора с клавиатурой и небольшим дисплеем, имеют оперативную память 4—16 кб. В качестве внешней памяти часто используется обычный кассетный магнитофон. Более мощную разновидность представляет собой учебный компьютер. Он имеет оперативную память 48—64 кб, встроенную внешнюю память на гибких дисках и небольшое печатающее устройство.

Наиболее совершенная разновидность персональных компьютеров рассчитана на профессионалов. У таких компьютеров оперативная память достигает сотен килобайт, внешняя — десятков мегабайт. Они имеют богатый набор периферийного оборудования, развитое математическое обеспечение и по уровню вычислительного сервиса приближаются к большим ЭВМ. Кроме того, как мы уже говорили в предыдущем параграфе, персональные компьютеры могут быть использованы в качестве терминальных устройств для вхождения в сеть ЭВМ. Подключаясь с помощью своего персонального компьютера через концентратор терминалов к сети, пользователь получает доступ к вычислительным мощностям главных ЭВМ и к информации, хранящейся в банках данных сети.

В заключение сделаем некоторые общие замечания о путях дальнейшего развития вычислительной техники. Не будем говорить о совершенствовании элементной базы, увеличении быстродействия, расширении памяти — эти тенденции действуют постоянно, и пока их ослабления не заметно.

Наиболее существенное отличие машин следующего, пятого поколения от сегодняшних будет связано с повышением «интеллектуальных возможностей». Многие функции, которые в машинах четвертого поколения реализуются с помощью сложных программных комплексов, будут

заложены непосредственно в аппаратуру ЭВМ. В свою очередь их программное обеспечение должно быть направлено на развитие эвристических способностей. Нужно «научить» машины делать логические выводы из имеющейся информации, самостоятельно разрабатывать программы решения сложных задач по описанию их постановки на языке, близком к естественному языку человека. Широкое распространение получат системы речевого ввода и вывода, которые дадут возможность вести с машиной диалог в буквальном смысле слова. Все эти усовершенствования позволят ЭВМ играть еще более важную роль во многих областях интеллектуальной деятельности человека.

разработку составляют, как правило, свыше 70% общих затрат на создание вычислительной системы.

В математическом обеспечении современных ЭВМ можно выделить три основных элемента.

1. *Системы программирования.* Они включают языки программирования, трансляторы с них и некоторые вспомогательные средства, упрощающие отладку и модификацию программ.

2. *Пакеты прикладных программ.* Пакетом называют набор программ, предоставляющих пользователю практически готовые средства решения задач из какой-нибудь определенной области знаний.

3. *Операционные системы.* Это комплекс программ, управляющий выполнением всех других программ и обеспечивающий эффективность использования аппаратуры ЭВМ.

В следующих параграфах мы расскажем о перечисленных элементах математического обеспечения ЭВМ с точки зрения тех возможностей, которые они предоставляют для прикладного программирования и расчетов на ЭВМ.

§ 2. Языки программирования. Трансляторы

В § 2 предыдущей главы была приведена программа вычисления $\sqrt{a}$, написанная на машинном языке. На этом элементарном примере хорошо видны недостатки машинного языка как языка программирования. Цифровая форма записи команд, необходимость разбивать алгоритм на мелкие операции делают программу не наглядной и громоздкой, затрудняют ее отладку. «Индивидуальный характер» языков ЭВМ исключает прямой перенос программы с машины одного типа на машину другого типа. Процесс программирования на машинном языке сложен и трудоемок, он требует тщательности, большого внимания, хорошего знания особенностей ЭВМ, на которой предстоит проводить расчеты. Выполнить качественно такую работу могут только специально подготовленные люди. Не случайно в эпоху первых ЭВМ основную массу пользователей составляли профессиональные математики-программисты. Лишь немногие представители других специальностей (физики, инженеры) решались овладеть программированием на машинном языке, остальные были вынуждены идти со своими задачами «на поклон» к профессионалам.

Эти трудности в использовании ЭВМ были преодолены благодаря разработке специальных *языков программирова-*

ния (алгоритмических языков). Они существенно упростили процесс программирования, сделали его не зависящим от конкретной ЭВМ, способствовали тому, что прямой доступ к вычислительной технике смогли получить представители самых разных областей знаний.

Первый шаг в разработке языков программирования состоял в простой замене цифровой формы записи команд на более удобную для восприятия — символьную. Такой язык получил название *автокода*. При записи программы на автокоде вместо цифровых кодов операций указывают их названия (обычно в сокращенном виде). Например, вместо кодов 00, 02, 15 записывают ПЕРЕС (пересылка), ВЫЧ (вычитание), ПБОЛ (переход «по больше»). Вместо же адресов ячеек, в которых хранятся числа, указывают символы соответствующих переменных: X, DELTA, EPSILON и т. д. (Печатающие и читающие устройства, которые используются при работе с вычислительной техникой, не «знают» греческого алфавита, так что вместо греческих букв приходится употреблять другие обозначения, например названия этих букв.) Перед каждой командой, на которую возможен переход из другого места программы, записывается какое-нибудь слово — *метка*. При этом в самой команде перехода указывается метка, а не цифровой адрес соответствующей команды. Символьные обозначения переменных и метки, служащие для выделения нужных команд, называются *именами*.

Программы на автокоде гораздо более просты и наглядны, чем программы на машинном языке: по содержательным символам легче установить, какие операции и над какими величинами выполняются, куда и в каком случае передается управление и т. д. Приведем в качестве примера программу вычисления $\sqrt{a}$, записанную на автокоде (см. с. 92), и сравним ее с программой на машинном языке (см. с. 65). Чтобы идентичность двух программ была полной, мы и здесь не будем описывать операций ввода и вывода чисел.

Заканчивая обсуждение автокодов, подчеркнем, что при всех своих несомненных достоинствах они являются лишь трансформированными копиями машинных языков с их индивидуальными особенностями и зависимостью от ЭВМ. В связи с этим автокоды называют *машинно-ориентированными языками*.

Следующим шагом в развитии языков программирования было появление *проблемно-ориентированных языков*. В этом названии нашел отражение тот факт, что при их

разработке идут не «от машины», а «от задачи»: в языке стремятся максимально полно учесть специфику класса задач, для решения которых его предполагается использовать. Например, для многих научно-технических задач характерны большие расчеты по сложным формулам, поэтому в ориентированные на такие задачи языки вводят удобные средства для их записи. Использование понятий, терминов, символов, привычных для специалистов соответствующей области знаний, облегчает им изучение языка, упрощает процесс составления и отладки программ.

Программа вычисления $\sqrt{a}$, записанная на автокоде

Команды			Примечания
Названия операций и		переменных	
			Ввод и перевод в двоичную систему счисления чисел a, ε, x_0, c_0
	ПЕРЕС	X0, 0, X	$x_0 \Rightarrow x$
ЦИКЛ	ДЕЛ	A, X, Y	$a/x \Rightarrow y$
	СЛОЖ	X, Y, Y	$x+y \Rightarrow y$
	УМН	HALF, Y, X	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow x$
	УМН	X, X, Y	$x^2 \Rightarrow y$
	ВЫЧ	Y, A, Y	$y-a \Rightarrow y$
	ДЕЛ	Y, C0, Y	$y/c_0 \Rightarrow y$
	УМН	HALF, Y, DELTA	$0{,}5 \cdot y \Rightarrow \delta$
	ПБОЛ	DELTA, EPSILON, ЦИКЛ	Если $\delta > \varepsilon$, то перейти на команду ЦИКЛ
			Перевод в десятичную систему счисления и печать чисел x, a, ε
			Останов

Проблемно-ориентированные языки обычно называют *алгоритмическими языками высокого уровня*. Уровень языка характеризует степень его близости к естественному, человеческому языку. Машинный язык не похож на человеческий. Он крайне беден в своих изобразительных средствах. Поэтому при записи на нем программ приходится пользоваться длинными и внешне однообразными фразами, а алгоритм разбивать на множество мелких, элементарных операций. Средства записи программ на алгоритмических языках высокого уровня более выразительны и привычны для человека. Например, алгоритм вычисления по сложной формуле не разбивается на отдельные операции, а записы-

вается компактно, в виде одного предложения с использованием привычной математической символики. Составить свою или понять чужую программу на таком языке гораздо проще.

Важным преимуществом алгоритмических языков высокого уровня по сравнению с машинным языком или автокодом является их универсальность, независимость от ЭВМ. Программа, написанная на таком языке, может выполняться на разных машинах. Составителю программы не нужно знать систему команд ЭВМ, на которой он предполагает проводить вычисления. При переходе на другую ЭВМ программа не требует переделки.

Алгоритмические языки высокого уровня в силу своей лаконичности и строгости правил построения предложений дисциплинируют мышление. Логическое несовершенство метода, скрытые изъяны сравнительно легко обнаруживаются при попытке его описания на алгоритмическом языке. Такие языки — не только средство общения человека с машиной, но и людей между собой. Программа, написанная на алгоритмическом языке, легко может быть понята любым специалистом, который знает язык и характер задачи. В сочетании с фактором машинной независимости это существенно упростило обмен программами между различными научными центрами.

В качестве примера алгоритмического языка высокого уровня рассмотрим алгол-60, уже упоминавшийся в предыдущей главе. Программы на алголе записываются с помощью нескольких служебных слов на английском языке и символов (букв, цифр, математических знаков), которые используются для обозначения переменных и записи формул. Служебными словами в алголе являются слова: **begin** — начало, **end** — конец, **real** — вещественный, **go to** — перейти к, **if** — если, **then** — тогда и некоторые другие. В текстах программ они выделяются: в печатном издании набираются полужирным шрифтом, в рукописном тексте подчеркиваются. Формулы записываются в виде, близком к общепринятому, с учетом двух правил:

1) формулы «вытягиваются» в строку, «многоэтажные» записи формул не допускаются;

2) для каждой операции используется только один знак; для сложения, вычитания, умножения, деления и возведения в степень такими знаками являются $+$, $-$, $\times$, $/$, $\uparrow$.

Первое правило связано с тем, что любую информацию вводят в ЭВМ последовательно символ за символом. Второе правило касается в первую очередь умножения и деления, которые мы привыкли в повседневной практике обозначать по-разному. В алголе этого делать нельзя. Не разрешается употреблять в качестве знака умножения точку, в качестве знака деления — двоеточие или горизонтальную черту, не разрешается также опускать знак умножения. При использовании знака возведения в степень ↑ слева от него указывается основание степени, справа — показатель. Например, вместо a^3, d^2 пишут $a \uparrow 3$, $d \uparrow 2$. Такая форма записи обусловлена первым правилом, которое не допускает выхода за пределы строки. С учетом сделанных замечаний формула

$$\frac{a^3+bc}{b-d^2}$$

запишется на алголе следующим образом:

$$(a\uparrow 3+b\times c)/(b-d\uparrow 2).$$

Каждая программа на алголе начинается и заканчивается служебными словами **begin** и **end**. Между ними записывается ее текст. Он состоит из предложений, которые по своему характеру делятся на *описания* и *операторы*. Назначение описаний — дать информацию о свойствах фигурирующих в программе величин. С помощью операторов указываются действия, которые должны быть над ними выполнены. Различные действия задаются операторами разного типа: операторами присваивания, условными операторами и т. д. Их смысл легко понять на конкретном примере, в качестве которого снова возьмем программу вычисления $\sqrt{a}$. Запишем ее теперь на алголе-60:

```
          begin
          real a, epsilon, x, x0, c0;
          input (a, epsilon, x0, c0);
          x := x0;
cycle:    x := (a/x+x)/2;
          if(x↑2-a)/(2×c0) > epsilon
          then go to cycle;
          output (x, a, epsilon)
          end
```

Прокомментируем эту программу. Служебные слова **begin** и **end** указывают ее начало и конец.

Первое предложение программы, начинающееся служебным словом **real**, является описанием. В нем перечисляются названия всех использованных переменных *) и указывается, что их значениями будут вещественные числа.

Второе предложение — оператор ввода переменных *a*, *epsilon*, *x*0, *c*0 (*input* — ввести). Он не только вводит соответствующие числа в машину, но и переводит их из десятичной системы счисления в двоичную.

Третье и четвертое предложения являются операторами присваивания. Справа от знака этого оператора := записывается формула, по которой должны проводиться вычисления, слева указывается переменная, которой присваивается полученный результат. Отметим, что в нашей программе при выполнении первого из этих операторов никаких вычислений фактически проводить не нужно, просто переменной *x* присваивается значение переменной *x*0. Перед вторым оператором присваивания поставлена метка *cycle* (цикл). Она позволяет ссылаться на данный оператор из других мест программы.

Пятое предложение программы, занимающее две строки, начинается словом **if**. Оно представляет собой условный оператор. Принцип действия этого оператора состоит в следующем: проверяется условие, сформулированное между словами **if** и **then**

$$\frac{x^2-a}{2c_0} > \varepsilon,$$

Если неравенство верно, то нужно выполнить оператор, который стоит после слова **then**. В программе это оператор перехода **go to**. Он отправляет к предложению с меткой *cycle*, чтобы вычислить новую итерацию. В противном случае, когда неравенство не выполняется, машина переходит к следующему шестому предложению. В нем стоит оператор вывода на печать переменных *x*, *a*, *epsilon* (*output* — вывести) с переводом их из двоичной системы счисления в десятичную. На этом выполнение программы заканчивается.

Итак, знакомясь с программированием, мы привели четыре варианта программы вычисления $\sqrt{a}$ (см. с. 61, 65, 92, 94). Самой простой, наглядной и компактной является

*) Обратим внимание на то, что для переменных x_0, c_0 использованы обозначения *x*0, *c*0. Мы уже отмечали выше, что применять обозначения с подстрочными и надстрочными индексами в алголе нельзя. Для обозначения переменной ε, как и в автокоде, использовано название той греческой буквы *epsilon*.

программа на алголе-60. Она выигрывает не только у программ на машинном языке и автокоде, но даже у самой первой программы на описательном «человеческом» языке.

Выше уже отмечалось, что каждый проблемно-ориентированный язык предназначен для программирования задач определенного класса. Специализация обусловлена существенными различиями в задачах, решаемых с помощью вычислительной техники. Разнообразие классов задач привело к тому, что на сегодняшний день разработано несколько сотен алгоритмических языков. Правда, широкое распространение и международное признание получили лишь 10—15 языков. Среди них в первую очередь нужно отметить фортран и алгол-60, предназначенные для решения научно-технических задач, кобол — для решения экономических задач, симула — для решения задач моделирования, бейсик — для решения небольших вычислительных задач в диалоговом режиме работы ЭВМ, лисп — для решения задач обработки символьной информации.

В принципе каждый из этих языков можно использовать для решения задач не своего класса. Однако, как правило, применение оказывается неудобным. В то же время математикам-прикладникам нередко приходится менять сферу своей деятельности. Такой переход может потребовать изучения нового языка, что создает определенные трудности. В связи с этим в середине 60-х годов начали разрабатывать алгоритмические языки широкой ориентации. Обычно они строились по принципу объединения возможностей узкоориентированных языков. Среди них наиболее известны ПЛ/1, паскаль, ада. Однако, как любое универсальное средство, широкоориентированные языки во многих конкретных задачах оказываются менее эффективными. Поэтому наряду с тенденцией к универсальности имеется тенденция к специализации.

В последние годы начата разработка языков нового типа — так называемых *непроцедурных языков* или *языков спецификаций* (описаний). Они принципиально отличаются от упоминавшихся языков тем, что предназначены не для записи алгоритма решения, а лишь для описания постановки задачи (что дано, что требуется получить). При этом поиск решения задачи возлагается непосредственно на ЭВМ. Разработка непроцедурных языков связана с появлением пакетов прикладных программ, о которых будет рассказано в следующем параграфе. Начаты также исследования, направленные на разработку средств общения человека с

ЭВМ на естественном языке (русском, английском и т. д.). Пока они далеко не продвинулись, так как сталкиваются с огромными трудностями. Суть проблемы не в том, чтобы ввести в машину текст на естественном языке (это делается давно), а в том, чтобы научить ее такой текст «понимать».

Обсудим, наконец, последний вопрос. Мы уже знаем из предыдущей главы, что ЭВМ может работать только по программе, которая написана на ее машинном языке. Алгоритмические же языки являются для ЭВМ «непонятными», и программа, составленная на одном из таких языков, для своего исполнения должна быть сначала оттранслирована, т. е. переведена на ее машинный язык.

Наиболее просто проблема трансляции решается для автокода, который очень близок к машинному языку. Чтобы понять принцип трансляции с автокода, предположим сначала, что эту работу должен выполнить человек. В начале своей работы он составляет две таблицы. Одна устанавливает взаимно однозначное соответствие между символьными обозначениями операций и их цифровыми кодами, вторая — между встречающимися в программе именами и адресами ячеек памяти, выделенными для хранения соответствующей информации: команд, снабженных метками, и численных значений переменных. Вооружившись этими таблицами, человек должен просмотреть всю программу команду за командой и заменить символьные обозначения автокода цифровыми. В результате он получит программу, эквивалентную исходной, но записанную на машинном языке.

Описанная процедура трансляции с автокода представляет собой хорошо алгоритмизованный процесс, так что ее может осуществить не только человек, но и ЭВМ. Для этого нужно написать на машинном языке специальную программу, воспроизводящую действия человека-переводчика. Такие программы были созданы и получили название *ассемблеров* (сборщиков). В связи с этим автокод часто называют *языком ассемблера*.

Для каждого типа ЭВМ ассемблер разрабатывается один раз, затем его можно многократно использовать для трансляции различных автокодных программ. Опишем коротко принцип работы ассемблера. Обычно эта программа вместе с таблицей соответствия двух форм записи операций в виде названий и в виде цифровых кодов хранится во внешней памяти ЭВМ. Вводя в оперативную память машины автокодную программу, предназначенную для трансляции, про-

граммист вызывает из внешней памяти ассемблер с таблицей и передает ему управление. Ассемблер проводит анализ программы, распределяет память, закрепляя за переменными и командами ячейки, в которых они будут храниться, формирует таблицу имен и сопоставленных им адресов ячеек памяти. Если таблица соответствия двух форм записи операций является универсальной, то вторая таблица для каждой программы индивидуальна. Она составляется непосредственно в процессе трансляции. Закончив эту работу, ассемблер, подобно человеку, просматривает транслируемую программу команду за командой и заменяет с помощью таблиц соответствия символьные обозначения операций цифровыми кодами, имена — адресами соответствующих ячеек. Преобразованные команды записываются друг за другом в отведенное им место в памяти машины. После окончания процесса трансляции версию программы на машинном языке можно вывести на печать или перфорацию для дальнейшего использования, а можно сразу передать на нее управление и приступить к расчетам.

Разработка трансляторов с проблемно-ориентированных языков является несравненно более сложным делом. Такие языки по своей структуре далеки от машинного и трансляция программы не сводится к простой замене одних обозначений другими с помощью таблиц взаимно однозначного соответствия. Обычно над созданием транслятора с алгоритмического языка высокого уровня работает группа системных программистов в течение нескольких месяцев и даже лет. Чем богаче по своим возможностям язык, тем сложнее разработка транслятора для него. После создания транслятора схема работы с программами на соответствующем языке оказывается аналогичной описанной выше схеме работы с программами на автокоде.

Трансляция программ требует расхода машинного времени. Однако эти потери окупаются преимуществами, которые дает программирование на алгоритмических языках по сравнению с программированием на языке машины.

Транслятор берет на себя ряд элементов работы программиста, например распределение памяти. Он упрощает отладку программы, проводит подробный анализ ее текста и при наличии ошибок в правилах употребления языка указывает точное место каждой из них. Однако возможны ошибки, которые правилам употребления языка не противоречат. Предположим, например, что в некоторой формуле по невнимательности программиста вместо знака «минус»

поставлен знак «плюс». Такие ошибки транслятор обнаружить не может. Их должен находить сам программист с помощью пробных, тестовых расчетов.

§ 3. Стандартные подпрограммы. Библиотеки. Пакеты прикладных программ

В самом начале эры ЭВМ, еще при работе на вычислительной технике первого поколения, было отмечено, что при составлении программ для решения различных задач могут многократно повторяться фрагменты, требующие выполнения одних и тех же действий. Например, при расчете по формуле

$$\frac{e^{\sin(ax)} - e^{\sin(bx)}}{e^{\cos(ax)} + e^{\cos(bx)}}$$

нужно два раза вычислить синус и косинус и четыре раза экспоненту. В программировании разработан простой и удобный способ, который позволяет не выписывать по нескольку раз набор команд для выполнения повторяющихся операций. Этот способ заключается в оформлении соответствующих фрагментов программы в виде отдельных подпрограмм.

Подпрограммой называется последовательность команд, выполняющая какое-либо законченное действие и оформленная таким образом, чтобы ее можно было использовать в нескольких местах одной программы или в разных программах. Подпрограмма составляется один раз, а используется многократно. Когда возникает необходимость обратиться к подпрограмме, в соответствующем месте основной программы записывается несколько команд. Они формируют нужную информацию и передают управление подпрограмме. Выполнив необходимые вычисления, подпрограмма возвращает управление основной программе.

Многие подпрограммы создаются непосредственно пользователями ЭВМ в процессе разработки своих программ. Однако такие действия, как, например, перевод чисел из одной системы счисления в другую, вычисление элементарных функций, встречаются практически во всех программах. Составлять каждому пользователю для них свои подпрограммы неразумно. Чтобы избежать ненужного дублирования, стали разрабатывать для различных ЭВМ наборы подпрограмм «широкого спроса». Их создавали и тщательно отлаживали группы высококвалифицированных специа-

листов. Предоставленные в распоряжение всех пользователей, такие подпрограммы получили название *стандартных подпрограмм*. (Иногда их называют стандартными программами.) Создание стандартных подпрограмм и их широкое использование было исторически первым шагом на пути автоматизации программирования (алгоритмические языки появились позже). Этот шаг оказался очень важным. Стандартные подпрограммы не только упрощают и ускоряют программирование, они позволяют «обучать» машину, развивать ее возможности.

Стандартные подпрограммы расширяют набор операций, выполняемых ЭВМ. Предположим, что в некоторой машине вычисление $\sqrt{x}$ предусмотрено ее конструкцией и выполняется по одной из команд, а у другой машины такой команды нет, но для вычисления $\sqrt{x}$ создана стандартная подпрограмма. С точки зрения человека, столкнувшегося с необходимостью использовать операцию извлечения корня в своей программе, никакого принципиального различия между этими машинами нет. Выполнение операции *аппаратно* (с помощью одной из команд, предусмотренных конструкцией ЭВМ) или *программно* (с помощью стандартной программы) для пользователя выглядит практически одинаково. Это очень важно. Число операций, выполняемых аппаратно, сравнительно невелико и для уже построенных ЭВМ его изменить нельзя. При проектировании новых ЭВМ расширить систему команд можно, но это требует усложнения аппаратуры. Увеличение же числа операций, выполняемых программно, не связано ни с какими принципиальными ограничениями и осуществляется сравнительно просто: нужно разработать стандартные подпрограммы, соответствующие новым потребностям.

Идея развития возможностей ЭВМ программным путем оказалась очень плодотворной. Наряду со стандартными подпрограммами в помощь прикладным программистам начинают заготовлять программы для решения многих типичных задач. В качестве примера можно указать задачи линейной алгебры, численного интегрирования, решения дифференциальных уравнений, специальных прикладных задач. Совокупность таких программ, созданных для какой-либо ЭВМ, объединенных и организованных определенным образом, называют *библиотекой*.

Стандартные программы нужны практически всем пользователям. Те из них, которые пользуются особенно широ-

ким спросом, хранятся обычно в оперативной памяти машины. Библиотеки имеют более узкую направленность, рассчитаны на специальные группы пользователей и хранятся, как правило, во внешней памяти.

Число программ, входящих в состав достаточно развитой библиотеки, может измеряться сотнями. Чтобы упростить работу с ними, создают специальную обслуживающую программу, называемую *библиотекарем*. Библиотекарь «знает», какие программы входят в библиотеку и где они хранятся во внешней памяти. Когда программисту нужно использовать какую-нибудь библиотечную программу, он сообщает ее название библиотекарю. Тот находит заказанную программу во внешней памяти, переписывает ее оттуда в оперативную память и включает в соответствующее место основной программы. Тем самым с программиста снимаются многие хлопоты по использованию библиотеки. Сотрудники вычислительного центра, сопровождающие библиотеку, «информируют» библиотекаря о всех изменениях в ее составе: о включении новых программ и исключении программ, ставших ненужными. Благодаря этому по таким вопросам библиотекарь может давать пользователям справки. Большие развитые библиотеки для удобства работы часто делят на тематические разделы.

Программы первых библиотек, как и стандартные подпрограммы, были написаны на машинном языке. В дальнейшем широкое распространение получили библиотеки на алгоритмических языках, особенно на фортране.

Библиотеки сыграли важную роль в автоматизации программирования. Однако на определенном этапе развития вычислительной математики и вычислительной техники возникла необходимость в новой форме организации работы по использованию накопленного программного «богатства». Обычно библиотеки создавались постепенно, в течение достаточно длительного промежутка времени. Входящие в их состав программы разрабатывались разными авторами, нередко в разных организациях. Единого подхода к их созданию и накоплению не было. В результате программы, даже принадлежащие к одному тематическому разделу библиотеки, часто оказывались разрозненными, не рассчитанными на совместное использование. Поэтому они могли не охватывать всего круга типичных задач из соответствующей области. Недостаточно были развиты средства сборки основной программы из библиотечных программ, поэтому пользователь библиотеки был вынужден сам дописывать многие

недостающие фрагменты и тратить силы на стыковку программ. Любые изменения, даже если они были связаны с заменой только одной библиотечной программы, требовали осуществлять процесс сборки и стыковки заново. Пока программы были сравнительно небольшими, с этими недостатками мирились. Однако переход в конце 60-х — начале 70-х годов к большим задачам (размеры программ для их решения стали достигать сотен тысяч команд) потребовал усовершенствования формы работы. Так появились пакеты прикладных программ.

Пакет — это комплекс взаимосвязанных программ, предназначенный для решения любой задачи из какой-нибудь конкретной области. Пакеты имеют, как правило, ярко выраженный *проблемно-ориентированный характер*. Например, существуют пакеты для расчета крыла самолета, атомного реактора, а также пакеты «служебного» типа для решения определенного класса математических задач. В известном смысле пакет представляет собой дальнейшее развитие идеи тематического раздела библиотеки. Основное различие между ними состоит в том, что программы библиотеки обычно используются независимо, а программы пакета рассчитаны на совместное применение в различных комбинациях друг с другом.

Создание пакета требует комплексного подхода, совместного труда прикладных и системных программистов. Приступая к его разработке, создатели прежде всего проводят анализ всех задач из соответствующей области и выделяют класс подзадач, к которым они сводятся. Для каждой подзадачи разрабатывается алгоритм ее решения и пишется соответствующая программа, которую обычно называют *модулем*. Совокупность модулей составляет *функциональное наполнение пакета*.

Наряду с функциональным наполнением создается *системное наполнение*, которое состоит из служебных программ, предназначенных обеспечить пользователям пакета максимальные удобства. Эти программы управляют работой всего пакета, анализируют и выполняют задания пользователей, автоматизируют процесс сборки их программ из модулей, позволяют производить пополнение пакета, вносить изменения в его модули. Важно, чтобы язык общения пользователей с пакетом прикладных программ был прост, гибок, удобен.

В простейших пакетах, чтобы решить какую-нибудь конкретную задачу, пользователь пишет на алгоритмиче-

ском языке (например на фортране) программу, которая представляет собой последовательность обращений к нужным модулям пакета. При этом программист сам определяет, какие модули ему понадобятся и в каком порядке, сам организует передачу данных от одного модуля к другому. В целом это похоже на работу с библиотекой, однако пакет предоставляет более удобные средства для выполнения всех работ по сборке и стыковке модулей, а сам набор модулей более богат и взаимосвязан.

Наряду с этим существуют пакеты другого типа. При их создании заранее фиксируется набор допустимых задач из некоторой области. Для каждой задачи из этого набора составляется последовательность модулей, выполнение которых обеспечивает получение решения. При работе с таким пакетом пользователь может не знать ни его состава, ни принципов внутренней организации. Он должен только на языке общения с пакетом указать название своей задачи (принадлежащей к допустимым) и дать необходимую информацию: исходные данные, требуемую точность, форму выдачи результатов и т. д. Все остальное программа, управляющая работой пакета, сделает сама.

Мы описали два крайних случая. Достоинства каждого из них являются одновременно и его недостатками. Поэтому многие пакеты создаются как промежуточные варианты описанных выше. С одной стороны, для определенного набора типичных задач в них заранее фиксирована последовательность модулей, осуществляющая решение. С другой стороны, пользователь имеет возможность сам составлять нужные комбинации модулей, чтобы решать «несерийные» задачи. В этом случае он должен составить программу, вызывающую и стыкующую нужные модули. Такой промежуточный тип пакета является наиболее распространенным.

В настоящее время проводится разработка пакетов нового типа. Получив от пользователя описание постановки задачи, такой пакет должен провести ее анализ и осуществить сборку модулей, обеспечивающих решение. Важно подчеркнуть, что нужная последовательность модулей не задается заранее. Система управления пакетом находит ее сама по описанию задачи. Для этого используются методы «искусственного интеллекта». Разработка таких «умных» пакетов находится в начальной стадии. Пока с их помощью удается формировать без вмешательства человека нужную последовательность модулей только для сравнительно простых задач.

§ 4. Операционные системы

В предыдущих параграфах было рассказано о тех частях математического обеспечения ЭВМ, которые облегчают создание прикладных программ и использование в них разработанных ранее программ. Теперь мы познакомимся с *операционными системами*, управляющими процессом выполнения этого комплекса программ.

Прообразом современных операционных систем явились *мониторные системы*, которые предоставляли пользователям средства, упрощающие работу на ЭВМ в однопрограммном режиме. Выше уже отмечалось, что трансляторы и библиотеки хранятся во внешней памяти машин. На первых порах, чтобы воспользоваться этими средствами в своей работе, программист должен был самостоятельно описать все действия, связанные с их вызовом в оперативную память ЭВМ. С появлением мониторных систем для выполнения таких операций стало достаточно подложить к своей программе несколько управляющих перфокарт. В них на специальном языке, который называют *языком управления заданиями*, указывается, какой транслятор, какие библиотеки нужны для работы, и, в случае необходимости, сообщается некоторая дополнительная информация о задаче. На основании этих данных монитторная система осуществляет вызов нужного транслятора, выборку заказанных библиотечных программ и включение их в основную программу, исполнение программы, обработку ошибок, которые могут при этом выявиться, и выдачу соответствующей информации о них программисту.

Совокупность программы, исходных данных для нее и управляющих перфокарт называется *заданием*. Ниже в качестве примера приводится схема задания для мониторной системы Дубна, разработанная в Объединенном институте ядерных исследований для ЭВМ БЭСМ-6:

```
*NAME ИВАНОВ
*LIBRARY:2
*ALGOL
 программа на алголе-60
*EXECUTE
 исходные данные
*END FILE
```

Строки, начинающиеся со звездочек,— это управляющие карты. В первой из них приведена фамилия автора, которая

будет напечатана в начале выдачи по данной программе. Вторая карта указывает, что в задании предполагается использовать программы библиотеки № 2 (library — библиотека). Названия нужных библиотечных программ задаются не в управляющей карте, а непосредственно в тексте основной программы. Третья карта представляет собой заказ на вызов транслятора с языка алгол-60. После управляющих карт, которые мы только что обсудили, следует текст основной программы на алголе-60, а затем еще одна управляющая карта EXECUTE (выполнить). Она сообщает мониторной системе, что после трансляции программы нужно сразу приступить к ее выполнению, а не записывать, скажем, на хранение во внешнюю память машины. Исходные данные, необходимые для проведения расчетов, следуют за картой EXECUTE. Последняя управляющая карта фиксирует конец задания.

Отметим, что карты LIBRARY и ALGOL дают разную информацию о задании и являются поэтому независимыми. Их можно располагать в любом порядке. Общее число управляющих карт в задании не фиксировано. Например, если в основной программе не предусмотрено использование библиотеки, то карта LIBRARY не нужна, и наоборот, возможны задания, на формирование которых потребуется больше управляющих карт, чем в приведенном примере. Все управляющие карты, кроме индивидуальной карты-паспорта с фамилией автора задания, являются стандартными. В вычислительных центрах их готовят заранее, так что набрать из них нужный комплект не составляет никакого труда.

В предыдущей главе уже отмечалось, что однопрограммный режим использования высокопроизводительных ЭВМ неэффективен. Слишком много приходится простаивать центральному процессору, пока работают очень медленные по сравнению с ним устройства ввода и вывода. Поэтому для третьего поколения ЭВМ были разработаны операционные системы, которые обеспечивали *пакетную обработку заданий в мультипрограммном режиме*.

В однопрограммном режиме, пока выполняется одно задание, другие задания в машину не вводятся. Они ждут своей очереди. В мультипрограммном режиме работа организована иначе. Сначала формируется *пакет заданий*: собираются вместе несколько заданий и записываются во внешнюю память ЭВМ (обычно на магнитный диск). После этого управление передается операционной системе. Она

считывает первую программу в оперативную память и поручает центральному процессору начать ее выполнение. Центральный процессор работает с программой до тех пор, пока в ней не возникает необходимость обмена (ввода или вывода). В этот момент операционная система включает устройство ввода-вывода, которое может работать автономно, удаляет первую программу во внешнюю память, а оттуда считывает вторую программу. Теперь центральный процессор начинает работать со второй программой, а автономное устройство ввода-вывода выполняет обмен, предусмотренный первой программой. Когда во втором задании возникает необходимость обмена, операционная система поступает точно так же: включается соответствующее устройство ввода-вывода, а программа убирается во внешнюю память. На ее же место в оперативную память либо возвращается первая программа, если предусмотренный в ней обмен уже закончился, либо считывается третья программа.

Итак, при пакетной обработке заданий в мультипрограммном режиме машина выполняет сразу несколько программ. Центральный процессор работает с ними последовательно: пока по одной программе проводятся вычисления, другие программы либо обслуживаются внешними устройствами, либо ждут своей очереди. Если программы пакета не перегружены обменом и внешние устройства с ним справляются, то центральный процессор все время активно работает. В результате эффективность использования ЭВМ по сравнению с однопрограммным режимом повышается.

Однако в области развития и использования вычислительной техники ситуация меняется очень быстро. То, что еще вчера казалось верхом совершенства, сегодня обнаруживает недостатки. Так получилось с пакетной обработкой заданий. С появлением выносных терминалов начались настойчивые поиски путей улучшения контактов человека с машиной. Пакетный режим оказался для этой цели неудобным. Чтобы понять причину, представим, что несколько пользователей ввели с выносных терминалов свои программы. Машина сформировала из них пакет и приступила к его обработке. Мы уже знаем, что центральный процессор в каждый момент времени ведет расчеты только по одной программе, а остальные программы должны ждать, пока не возникнет необходимость обмена. Программы бывают разные. Может случиться, что в выполняемой программе

выдача результатов предусмотрена только после продолжительных расчетов. В обычном пакетном режиме, когда машина работает без прямых контактов с пользователями, это не страшно. В диалоговом режиме, когда пользователи сидят за терминалами и ждут своей очереди, длительное использование процессора одной задачей неприемлемо.

Выход из описанной ситуации довольно прост: каждой задаче нужно давать выполняться не дольше определенного времени (порядка долей секунды). Если за это время она не закончится или не наступит обмен, то операционная система прекращает с ней работу и отправляет всю информацию о ней во внешнюю память, вызвав оттуда следующую задачу. С ней также операционная система разрешает центральному процессору работать лишь определенное время, после чего вызывает третью задачу и т. д. Такая форма мультипрограммной работы называется *режимом разделения времени* центрального процессора между несколькими программами.

В настоящее время операционные системы, обеспечивающие разделение времени, являются наиболее широко распространенными. Они эффективно загружают центральный процессор и позволяют при этом сразу нескольким пользователям работать в диалоге с ЭВМ. Пользователи сидят за выносными терминалами и, общаясь с ЭВМ, выполняют свои программы. Благодаря частому переключению центрального процессора с одной программы на другую, у каждого из них создается иллюзия, что машина находится в его личном распоряжении. После очередной порции расчетов и выдач они имеют возможность подумать, проанализировать результаты, выданные на экран дисплея, внести изменения в программу, задать новый вариант данных и т. д. Может получиться так, что одновременно несколько пользователей задумаются над своими задачами. Чтобы машина не простаивала в подобных ситуациях, в нее вводят небольшой пакет программ, который не требует контакта с их авторами. Такой пакет называется фоновым. Он используется в качестве резерва в случае, если центральный процессор окажется не полностью загруженным заданиями, которые выполняются в режиме диалога.

Важное значение для применения ЭВМ имеет еще одна разновидность операционных систем — *системы реального времени*. Они используются в тех случаях, когда ЭВМ управляет каким-нибудь устройством или процессом (маневром

спутника, работой атомного реактора, производственно-технологическим процессом и т. д.). Работа в режиме реального времени означает, что время, отпущенное машине на переработку поступающей информации и формирование управляющих сигналов, строго ограничено. Если машина в него не уложилась, то ее работа в лучшем случае окажется ненужной. Что может произойти в худшем случае, зависит от характера управляемого объекта. Конкретная продолжительность допустимого временного интервала для разных объектов различна. Она может меняться в очень широких пределах от долей секунды до нескольких часов.

Иногда машина, работающая в режиме реального времени, оказывается загруженной объектом управления не слишком сильно, тогда она может параллельно выполнять другие задания. Однако при таком двойном использовании ЭВМ программа управления имеет высокий приоритет. Она постоянно хранится в оперативной памяти машины, независимо от того, работает в данный момент или нет. Как только управляемый объект начинает подавать сигналы — запросы, машина немедленно прерывает все остальные расчеты, убирает соответствующие программы во внешнюю память и полностью переключается на управление.

После этого краткого описания основных типов операционных систем познакомимся с их структурой и принципами работы. Операционная система — это нижний уровень математического обеспечения ЭВМ. Она представляет собой совокупность программ на машинном языке. В процессе разработки элементов операционной системы может использоваться автокод и даже алгоритмические языки высокого уровня. Однако после того, как ее разработка закончена, все программы должны быть оттранслированы, т. е. переведены на язык ЭВМ. Наиболее важная часть операционной системы постоянно находится в оперативной памяти машины, остальные программы хранятся во внешней памяти на специальном магнитном диске.

Основными частями операционной системы являются *планировщик заданий*, *супервизор* и *программа, управляющая вводом-выводом*.

Назначение планировщика состоит в том, чтобы проанализировать задания, введенные в машину, и поставить их в очередь на выполнение. Чтобы планировщик мог справиться со своей задачей, в каждом задании содержится информация

о требуемых для его выполнения вычислительных ресурсах (времени расчета, объеме оперативной памяти, используемых магнитных лентах и дисках и т. д.). Если какой-нибудь из параметров в задании не указан, то планировщик принимает для него некоторое стандартное, заранее оговоренное значение. Получив такую информацию о задании, планировщик прежде всего проверяет, можно ли его в принципе выполнить, т. е. имеются ли в настоящее время у машины необходимые ресурсы. Только в случае положительного ответа на этот вопрос задание ставится на очередь. В противном случае планировщик посылает соответствующее сообщение операторам ЭВМ, но задание пока на очередь не ставит. Пусть, например, запрошенная в задании лента в данный момент на магнитофонах не стоит. Планировщик сообщит о появлении такого задания и попросит операторов поставить нужную ленту.

Принципы образования очереди для отобранных, «выполнимых» заданий могут быть самые разные. Часто используется простое житейское правило: «раньше пришел, раньше обслуживаешься». Возможен такой принцип: «чем меньше вычислительных ресурсов требует задание, тем ближе к началу очереди оно помещается». Используются и более сложные критерии. После того как очередь образована, операционная система начинает работу с заданиями, стоящими в начале очереди: выделяет место в оперативной памяти, устанавливает связь с заказанной библиотекой, вызывает нужный транслятор, осуществляет вычисления по оттранслированной программе. По мере изменения ситуации (при окончании какого-нибудь задания, поступлении нового задания, установлении затребованной ленты и т. д.) снова включается в работу планировщик и, руководствуясь установленными принципами, перестраивает очередь.

Вторая часть операционной системы — супервизор *) управляет работой центрального процессора и других устройств ЭВМ, осуществляет надзор за выполняющимися программами. Супервизор «знает», какая программа в настоящий момент вычисляется (занимает процессор), какие программы ведут обмен, а какие обмен закончили и готовы к продолжению расчетов. Супервизор учитывает поступающие от программ запросы на обмен, контролирует оконча-

*) Супервизор (по-английски — supervisor) — надсмотрщик, контролер, ассистент.

ние работы устройств ввода-вывода, принимает решение, какой программе следует предоставить центральный процессор и на какое время.

В своей работе супервизор широко пользуется такой аппаратной особенностью современных ЭВМ, как прерывание. *Прерывание* — это сигнал, который посылается центральному процессору другими устройствами машины при наступлении события, требующего внимания супервизора. Например, такой сигнал посылают: арифметическое устройство, когда в выполняющейся программе обнаруживается ошибка; устройство вывода, закончив печатать заданную порцию информации; операторский терминал, от которого поступило какое-то сообщение. При появлении сигнала прерывания работа над выполняющейся программой приостанавливается и управление передается на фиксированную команду супервизора. Все это делается аппаратно, поскольку до данного момента супервизор не работал (процессор был занят выполнением очередной программы). Получив сигнал, супервизор включается в работу. Он определяет причину прерывания и решает, что делать дальше. Пусть, например, сигнал прерывания поступил от устройства вывода: оно известило об окончании работы. В этом случае супервизор отмечает у себя, что устройство свободно, а программа, закончив обмен, готова к продолжению расчетов, и возобновляет работу по прерванной программе. Если причина прерывания — окончание времени, выделенного программе, по которой проводятся вычисления, то супервизор переводит ее в состояние ожидания и переключает процессор на следующую программу, возобновляя ее вычисления с прерванного ранее места. Реакция супервизора на ошибку — это прекращение вычислений по данной программе, печать сообщения об ошибке, возобновление работы следующей программы. Так с помощью прерывания супервизор управляет работой ЭВМ в мультипрограммном режиме.

Важной частью операционной системы являются программы управления вводом-выводом. Они избавляют пользователей от сложной работы по составлению заданий для внешних устройств, требующей хорошего знания технических возможностей каждого из них. Операционная система предоставляет готовый набор программ для организации обмена. Имея его в своем распоряжении, пользователь лишь указывает, что нужно ввести или вывести, на какое устройство и в какой форме.

Среди других элементов операционных систем отметим библиотекаря и программы вызова трансляторов, программы связи с операторами ЭВМ, программы диагностики неисправностей ЭВМ. Следует также упомянуть программы сбора статистики, которые фиксируют, какие задания выполнялись, сколько машинного времени, бумаги и других ресурсов на каждое из них было израсходовано. Этот краткий обзор показывает, каким огромным и сложным хозяйством являются операционные системы современных ЭВМ и какую важную роль в их эксплуатации они играют.

ГЛАВА 5

СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Эта глава посвящена системам линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n &= f_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n &= f_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n &= f_m. \end{aligned} \tag{1}$$

Такую систему удобно записать в компактной векторно-матричной форме

$$Ax = f. \tag{1'}$$

Здесь A — матрица коэффициентов, содержащая m строк и n столбцов:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{m1} & a_{m2} & \ldots & a_{mn} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

f — заданный m-компонентный вектор, x — искомый n-компонентный вектор:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \ldots \\ f_m \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \ldots \\ x_n \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Из линейной алгебры известно, что совокупность n-компонентных векторов вида (3) образует n-мерное *линейное пространство*: для них определены операции сложения и умножения на число, удовлетворяющие 8 аксиомам линейного пространства.

По аналогии с векторами в обычном трехмерном пространстве введем понятие длины или *евклидовой нормы*

n-компонентных векторов:

$$\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}. \tag{4}$$

Опираясь на евклидову норму (4), определим расстояние между векторами:

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}. \tag{5}$$

Пространство n-компонентных векторов с расстоянием (5) называется *n-мерным евклидовым пространством* и обозначается символом $\mathbf{R}^n$. Понятия евклидовой нормы вектора (4) и расстояния между векторами (5) понадобятся нам при обсуждении методов решения системы (1).

§ 1. Формулы Крамера

Основное внимание в этой главе будет уделено системам, у которых число уравнений равно числу неизвестных ($m=n$):

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n &= f_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n &= f_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n &= f_n, \end{aligned} \tag{6}$$

или в векторно-матричной форме:

$$Ax = f, \tag{6'}$$

где A — квадратная матрица, содержащая n строк и n столбцов, f и x — заданный и искомый n-компонентные векторы.

Предположим, что система (6) невырождена, т. е. ее определитель отличен от нуля: $\Delta = \det A \neq 0$. В этом случае она имеет единственное решение, которое может быть записано с помощью *формул Крамера*:

$$x_i = \Delta_i/\Delta, \qquad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{7}$$

Здесь $\Delta_i = \det A_i$, матрица A_i получается из матрицы A заменой i-го столбца столбцом правых частей f:

$$A_i = \begin{vmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1i-1} & f_1 & a_{1i+1} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & \ldots & a_{2i-1} & f_2 & a_{2i+1} & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{ni} & \ldots & a_{ni-1} & f_n & a_{ni+1} & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Хотя формулы Крамера дают решение системы (6) в

явном виде, с вычислительной точки зрения они неэффективны. Расчет по ним требует слишком большого числа операций и оказывается очень чувствительным к ошибкам округления. Поэтому на практике для решения линейных алгебраических систем используются другие методы, которые по принципам организации вычислений можно разделить на два класса: прямые и итерационные.

Прямыми методами называются такие методы, которые позволяют за конечное число действий получить точное решение системы. Слова «точное решение» нужно понимать условно как характеристику алгоритма, а не реального вычислительного процесса. Алгоритмы, лежащие в основе прямых методов, дают точное решение, если все величины в системе заданы и все вычисления проводятся абсолютно точно, без ошибок округления. К прямым методам относится, например, метод последовательного исключения неизвестных Гаусса, с которым мы познакомимся в следующем параграфе.

Итерационные методы, как показывает название, основаны на построении итерационной последовательности, сходящейся к искомому решению. Вычисляя определенное число итераций и обрывая процесс, можно получить приближенное решение системы с любой наперед заданной точностью ε.

Выбор в каждом отдельном случае метода решения алгебраической системы (6) определяется многими факторами: особенностями матрицы A, порядком системы n, характеристиками ЭВМ — ее архитектурой и операционной системой, быстродействием, памятью, программным обеспечением. Важную роль играет также характер решаемой задачи. Например, метод, который проигрывает при решении одной системы, может иметь преимущества в случае, когда нужно решать несколько систем с одной матрицей A и разными правыми частями f.

§ 2. Метод Гаусса

Метод последовательного исключения неизвестных Гаусса является одним из наиболее универсальных и эффективных методов решения линейных алгебраических систем. Как указывалось в предыдущем параграфе, он относится к числу прямых методов. Процесс решения по методу Гаусса состоит из двух этапов. На первом этапе (прямой ход) система (6) приводится к треугольному виду. На втором

этапе (обратный ход) идет последовательное определение неизвестных из этой треугольной системы.

Перейдем к подробному описанию метода Гаусса. Будем считать, что коэффициент a_{11}, который называют *ведущим элементом первого шага*, отличен от нуля. (В случае $a_{11}=0$ поменяем местами уравнения с номерами 1 и i, где $a_{i1}\neq 0$. Поскольку система предполагается невырожденной, такой номер i заведомо найдется.) Составим отношения

$$m_{21}=-\frac{a_{21}}{a_{11}}, \quad m_{31}=-\frac{a_{31}}{a_{11}}, \quad \ldots, \quad m_{n1}=-\frac{a_{n1}}{a_{11}}$$

и прибавим к i-му уравнению системы ($i=2, 3, \ldots, n$) 1-е уравнние, умноженное на m_{i1}. Проделав это, мы исключим неизеестное x_1 из всех уравнений, начиная со 2-го. Преобразованная система примет вид

$$\begin{aligned} a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3+\ldots+a_{1n}x_n&=f_1,\\ a_{22}^{(1)}x_2+a_{23}^{(1)}x_3+\ldots+a_{2n}^{(1)}x_n&=f_2^{(1)},\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots&\\ a_{n2}^{(1)}x_2+a_{n3}^{(1)}x_3+\ldots+a_{nn}^{(1)}x_n&=f_n^{(1)}. \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь $a_{ij}^{(1)}$, $f_i^{(1)}$ ($i, j=2, 3, \ldots, n$) — новые значения коэффициентов и правых частей, которые получаются после выполнения первого шага прямого хода метода Гаусса. Основным результатом этого шага является система $n-1$-го порядка с неизвестными $x_2, x_3, \ldots, x_n$, образованная последними $n-1$ уравнениями системы (8). Дальнейшим преобразованиям будем подвергать именно эту систему.

Переходя к выполнению второго шага, предположим, что элемент $a_{22}^{(1)}$, который называют *ведущим элементом второго шага*, отличен от нуля. (В противном случае нужно провести соответствующую перестановку уравнений.) Составим отношения

$$m_{32}=-\frac{a_{32}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}, \quad m_{42}=-\frac{a_{42}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}, \quad \ldots, \quad m_{n2}=-\frac{a_{n2}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}$$

и прибавим к i-му уравнению системы (8) ($i=3, 4, \ldots, n$) 2-е уравнение, умноженное на m_{i2}. В результате получим систему

$$\begin{aligned} a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3+\ldots+a_{1n}x_n&=f_1,\\ a_{22}^{(1)}x_2+a_{23}^{(1)}x_3+\ldots+a_{2n}^{(1)}x_n&=f_2^{(1)},\\ a_{33}^{(2)}x_3+\ldots+a_{3n}^{(2)}x_n&=f_3^{(2)},\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots&\\ a_{n3}^{(2)}x_3+\ldots+a_{nn}^{(2)}x_n&=f_n^{(2)}. \end{aligned} \tag{9}$$

После n—1-го шага мы придем к треугольной системе

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n &= f_1, \\ a_{22}^{(1)}x_2 + a_{23}^{(1)}x_3 + \ldots + a_{2n}^{(1)}x_n &= f_2^{(1)}, \\ a_{33}^{(2)}x_3 + \ldots + a_{3n}^{(2)}x_n &= f_3^{(2)}, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\ a_{nn}^{(n-1)}x_n &= f_n^{(n-1)}. \end{aligned} \tag{10}$$

Матрицу коэффициентов этой системы обозначим через R:

$$R = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \ldots & a_{1n} \\ & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & \ldots & a_{2n}^{(1)} \\ & & a_{33}^{(2)} & \ldots & a_{3n}^{(2)} \\ & 0 & & \ldots & \\ & & & & a_{nn}^{(n-1)} \end{Vmatrix}. \tag{11}$$

Приведение исходной системы (6) к треугольному виду (10) завершает первый этап построения решения методом Гаусса.

Второй этап — обратный ход — заключается в решении треугольной системы (10). Проводится оно следующим образом. Из последнего уравнения определяем x_n. По найденному значению x_n из n—1-го уравнения определяем x_{n-1}. Затем по значениям x_{n-1} и x_n из n—2-го уравнения определяем x_{n-2} и т. д. Последовательное вычисление неизвестных продолжается до тех пор, пока мы не определим из 1-го уравнения x_1. На этом процесс построения решения системы (6) с помощью решения эквивалентной ей системы (10) заканчивается.

Отметим, что прямой ход метода Гаусса требует $n^3/3 + O(n^2)$ операций сложения, столько же операций умножения и $n^2/2 + O(n)$ операций деления, обратный ход требует $n^2/2 + O(n)$ операций сложения, столько же операций умножения и n операций деления. Таким образом, приведение системы (6) к треугольному виду (10) на порядок n сложнее, чем построение решения этой системы.

В качестве примера, иллюстрирующего метод Гаусса, решим следующую систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned} 1{,}2357x_1 + 2{,}1742x_2 - 5{,}4834x_3 &= -2{,}0735, \\ 6{,}0696x_1 - 6{,}2163x_2 - 4{,}6921x_3 &= -4{,}8388, \\ 3{,}4873x_1 + 6{,}1365x_2 - 4{,}7483x_3 &= 4{,}8755. \end{aligned} \tag{12}$$

Все результаты расчетов условимся представлять в виде чисел с плавающей запятой с пятью значащими цифрами.

В рассматриваемом случае

$$m_{21} = -4{,}9119, \quad m_{31} = -2{,}8221.$$

В результате после первого шага гауссова исключения получим систему

$$\begin{aligned} 1{,}2357x_1 + 2{,}1742x_2 - 5{,}4834x_3 &= -2{,}0735, \\ -16{,}895x_2 + 22{,}242x_3 &= 5{,}3462, \\ 0{,}0007x_2 + 10{,}727x_3 &= 10{,}727. \end{aligned} \tag{13}$$

Чтобы сделать второй шаг, вычислим

$$m_{32} = \frac{0{,}0007}{16{,}895} = -0{,}41432 \cdot 10^{-4}$$

и приведем систему к треугольному виду:

$$\begin{aligned} 1{,}2357x_1 + 2{,}1742x_2 - 5{,}4834x_3 &= -2{,}0735, \\ -16{,}895x_2 + 22{,}242x_3 &= 5{,}3462, \\ 10{,}728x_3 &= 10{,}727. \end{aligned} \tag{14}$$

Решение треугольной системы (14) дает следующие значения неизвестных:

$$x_1 = 0{,}99968, \quad x_2 = 0{,}99994, \quad x_3 = 0{,}99991. \tag{15}$$

Этот результат хорошо согласуется с точным решением системы (12):

$$x_1 = x_2 = x_3 = 1. \tag{16}$$

В заключение отметим, что сведение системы (6) к системе (10) на первом этапе метода Гаусса связано с преобразованием матрицы A к треугольному виду. Это может быть использовано для вычисления ее определителя. Прямой ход метода Гаусса основан на том, что многократно выполняется операция сложения одной из строк матрицы с другой строкой, взятой с некоторым множителем. Известно, что такая операция не меняет определителя. Иногда приходится также переставлять уравнения, чтобы перед началом очередного шага элемент $a_{ii}^{(i-1)}$ был отличен от нуля. Перестановка строк матрицы меняет знак ее определителя на противоположный. С учетом этих замечаний получим

$$\det A = (-1)^k \det R = (-1)^k a_{11} a_{22}^{(1)} \ldots a_{nn}^{(n-1)},$$

где k — число перестановок строк в процессе редукции матрицы A к треугольной матрице R (11).

В качестве примера подсчитаем определитель матрицы коэффициентов системы (12). При преобразовании этой системы к треугольному виду (14) мы не делали перестановок уравнений. Следовательно, в данном случае $\det A = \det R = -223{,}97$.

Число операций, которое требуется для подсчета определителя по методу Гаусса, не идет ни в какое сравнение с вычислением определителя в лоб как суммы $n!$ его членов. Например, при прямом вычислении сравнительно небольшого определителя 20-го порядка требуется выполнить $19 \cdot 20! \approx 4{,}5 \cdot 10^{19}$ умножений. На машине, которая делает миллион умножений в секунду, такой расчет продолжался бы $1{,}4 \cdot 10^{6}$ лет.

§ 3. Уменьшение ошибок округления

Обратимся еще раз к системе (12). Поменяем в ней местами 2-е и 3-е уравнения и снова решим ее методом Гаусса, используя, как и в § 2, запись результатов вычислений в виде чисел с плавающей запятой с 5 значащими цифрами. После первого шага мы получим систему (13), в которой 2-е и 3-е уравнения поменялись местами. Второй шаг будет выглядеть иначе. В рассматриваемом случае

$$m_{32} = \frac{16{,}895}{0{,}0007} = 24\,136.$$

В результате после исключения из 3-го уравнения неизвестной x_2 получим систему треугольного вида:

$$\begin{aligned} 1{,}2357x_1 + 2{,}1742x_2 - 5{,}4834x_3 &= -2{,}0735, \\ 0{,}0007x_2 + 10{,}727x_3 &= 10{,}727, \\ 258\,930x_3 &= 258\,910. \end{aligned} \tag{17}$$

Определяя из нее последовательно x_3, x_2, x_1, найдем решение:

$$x_1 = 2{,}9021; \quad x_2 = 1{,}4286; \quad x_3 = 0{,}9992. \tag{18}$$

Если бы мы могли осуществить идеальный вычислительный процесс без ошибок округления, то независимо от порядка уравнений в обоих случаях получили бы один и тот же ответ — точное решение (16). Реальный вычислительный процесс дает приближенное решение, которое, как показывает приведенный пример, может существенно зависеть от порядка уравнений. В одном случае получается вполне разумный ответ (15), в другом ответ (18) находится с очень

большой ошибкой: у переменной x_1 неверно определена первая значащая цифра.

Анализируя вычисления, легко найти причину такого различия. Неприятности во втором случае связаны с малым значением ведущего элемента второго шага $a_{22}^{(1)}=0{,}0007$ и, соответственно, с большим значением коэффициента $m_{32}=24\,136$. Умножение на этот коэффициент приводит к резкому увеличению значения элементов 3-го уравнения системы (17), что, в конечном счете, и порождает большую вычислительную ошибку.

Чтобы избежать нежелательного роста значения элементов матрицы во время прямого хода и тем самым предотвратить большую потерю точности, обычно метод Гаусса применяют в сочетании с какой-нибудь схемой выбора ведущего элемента на каждом шаге. Мы рассмотрим простейшую и наиболее употребительную схему выбора ведущего элемента по столбцу, которая реализуется во многих стандартных программах метода Гаусса. Она заключается в следующем. Перед началом i-го шага исключения сравнивают между собой элементы i-го столбца матрицы, построенной на предыдущем шаге: $a_{ii}^{(i-1)}, a_{i+1i}^{(i-1)}, \ldots, a_{ni}^{(i-1)}$. Пусть наибольший по модулю элемент стоит в k_i-й строке $(i\leqslant k_i\leqslant n)$ тогда уравнения с номерами i и k_i меняют местами, переме; щая тем самым элемент $a_{k_i i}^{(i-1)}$ с максимальным модулем на ведущую позицию. После этого выполняют i-й шаг, исключая переменную x_i в уравнениях с номерами $i+1, i+2, \ldots, n$. При этом отношения m_{ji} $(i+1\leqslant j\leqslant n)$, которые вычисляются на каждом шаге процесса исключения, оказываются ограниченными по модулю единицей. В результате наибольший по модулю элемент матрицы коэффициентов за один шаг может возрасти не более чем в 2 раза. Этого, как правило, достаточно, чтобы предотвратить заметный рост значений элементов матрицы коэффициентов на протяжении всего процесса исключения. Существуют более сложные и более надежные схемы выбора ведущих элементов, на описании которых мы останавливаться не будем.

Любая специальная схема выбора ведущих элементов усложняет программу и требует дополнительных вычислительных ресурсов. Однако в конечном счете это себя оправдывает благодаря повышению точности решения задачи.

§ 4. Итерационные методы

Как отмечалось в § 1, итерационные методы основаны на построении итерационной последовательности y_0, y_1, y_2, ..., сходящейся к искомому решению системы x. Каждый такой метод характеризуется своей итерационной формулой, позволяющей вычислять очередное приближение y_{k+1} по ранее найденным. В простейшем случае при вычислении y_{k+1} используется только одна предыдущая итерация y_k. Такие методы называются *одношаговыми* или *двухслойными*. Итерационную формулу для одношаговых методов принято записывать в стандартной *канонической форме*:

$$B_{k+1}\frac{y_{k+1}-y_k}{\tau_{k+1}}+Ay_k=f. \tag{19}$$

Здесь τ_{k+1} — *итерационные параметры* ($\tau_{k+1}>0$), B_{k+1} — вспомогательные невырожденные матрицы. Если τ и B не зависят от индекса $k+1$, т. е. формула (19) при любых k имеет один и тот же вид, то итерационный метод называется *стационарным*. Стационарные методы наиболее просты с точки зрения организации вычислительного процесса. Однако *нестационарные методы* имеют другие преимущества: они предоставляют дополнительные «степени свободы», связанные с выбором последовательностей τ_{k+1}, B_{k+1}. Это может быть использовано для ускорения сходимости итераций y_k к решению системы x.

Определение очередного приближения y_{k+1} с помощью итерационной формулы (19) требует решения системы уравнений

$$B_{k+1}y_{k+1}=F_{k+1}, \tag{20}$$

где

$$F_{k+1}=(B_{k+1}-\tau_{k+1}A)y_k+\tau_{k+1}f.$$

Такую процедуру приходится выполнять на каждом шаге. Поэтому применение метода может быть оправдано лишь при условии, что определение отдельных членов итерационной последовательности y_{k+1} требует существенно меньшего объема вычислений, чем прямое решение исходной системы (6). Это накладывает определенные ограничения на выбор матриц B_{k+1}.

Самая простая схема вычисления членов итерационной последовательности получается в случае, когда в качестве матрицы B_{k+1} берут единичную матрицу: $B_{k+1}=E$; тогда формула (19) позволяет выразить в явном виде очередной

член последовательности y_{k+1} через предыдущий y_k:

$$y_{k+1}=y_k-\tau_{k+1}Ay_k+\tau_{k+1}f. \tag{21}$$

Итерационные методы, основанные на такой рекуррентной формуле, называются *явными*.

Среди *неявных* методов ($B_{k+1}\neq E$) наибольшее распространение получили методы, в которых матрицы B_{k+1} выбираются треугольными. В этом случае нахождение очередной итерации y_{k+1} сводится к последовательному определению компонент y_{k+1} из треугольной системы (20) подобно тому, как это делается при обратном ходе в методе Гаусса.

Применение какого-нибудь итерационного метода предполагает сходимость последовательности y_k к решению системы x:

$$\lim_{k\to\infty} y_k=x. \tag{22}$$

Предельное равенство (22) означает, что

$$\rho(y_k,\ x)=|y_k-x|=$$
$$=\sqrt{(y_1^{(k)}-x_1)^2+(y_2^{(k)}-x_2)^2+\ldots+(y_n^{(k)}-x_n)^2}\to 0. \tag{23}$$

Из (23) видно, что необходимым и достаточным условием сходимости последовательности векторов y_k к вектору x является покомпонентная сходимость

$$\lim_{k\to\infty} y_i^{(k)}=x_i,\qquad i=1,\ 2,\ \ldots,\ n. \tag{24}$$

Отличие итерации y_k от решения системы x называется *погрешностью*: $z_k=y_k-x$. Записывая y_k в виде $y_k=x+z_k$ и подставляя в (19), получим итерационную формулу для погрешности:

$$B_{k+1}\frac{z_{k+1}-z_k}{\tau_{k+1}}+Az_k=0. \tag{25}$$

В отличие от (19) она не содержит правой части системы f, т. е. является однородной. Требование сходимости (22) означает, что погрешность z_k должна стремиться к нулю:

$$\lim_{k\to\infty} z_k=0. \tag{26}$$

Достаточные условия сходимости каждого итерационного метода формулируются в виде условий, которым должны удовлетворять матрицы A, B_{k+1} и итерационные параметры τ_{k+1}. Некоторые из них, особенно относящиеся к оптимальному выбору итерационных параметров, трудно

проверить. В результате при проведении расчетов итерационные параметры часто приходится подбирать эмпирически.

После этой общей характеристики итерационных методов решения систем линейных алгебраических уравнений рассмотрим в качестве примера два конкретных метода.

1. Метод простой итерации. Метод простой итерации представляет собой явный стационарный метод: $B_{k+1}=E$, $\tau_{k+1}=\tau=\text{const}$. Для него рекуррентная формула (21) принимает вид

$$y_{k+1}=y_k-\tau Ay_k+\tau f \tag{27}$$

Чтобы сформулировать достаточное условие сходимости метода простой итерации, нам понадобятся два свойства матриц.

Матрица A называется *симметричной*, если ее элементы удовлетворяют условию $a_{ij}=a_{ji}$ $(i, j=1, 2, \ldots, n)$.

Отсюда видно, что у симметричной матрицы любые два элемента, расположенные симметрично относительно главной диагонали, должны быть равны между собой. Рассмотрим в качестве примера матрицы

$$A_1=\begin{vmatrix}-1 & 2\\ 2 & 5\end{vmatrix}, \qquad A_2=\begin{vmatrix}1 & 1\\ 3 & 5\end{vmatrix}. \tag{28}$$

Первая из них является симметричной ($a_{12}=a_{21}=2$), вторая — нет ($a_{12}=1$, $a_{21}=3$).

Матрица A называется *положительно определенной*, если для любого ненулевого вектора $\boldsymbol{x}$

$$\varphi(\boldsymbol{x})=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}x_ix_j>0. \tag{29}$$

Рассмотрим еще раз в качестве примера матрицы (28). Матрица A_1 не является положительно определенной. Действительно, для этой матрицы

$$\varphi_1(\boldsymbol{x})=\varphi_1(x_1, x_2)=-x_1^2+4x_1x_2+5x_2^2.$$

Если мы возьмем вектор $\boldsymbol{x}$ с компонентами $x_1=1$, $x_2=0$, то получим $\varphi_1=-1<0$, что противоречит (29). Наоборот, матрица A_2 является положительно определенной. Для нее

$$\varphi_2(\boldsymbol{x})=\varphi_2(x_1, x_2)=x_1^2+4x_1x_2+5x_2^2=(x_1+2x_2)^2+x_2^2>0$$

при $\|x\|^2=x_1^2+x_2^2$.

Предположим, что дана система линейных алгебраических уравнений с симметричной и положительно определен-

ной матрицей A. Можно доказать, что в этом случае множество значений параметра τ, для которых метод простой итерации сходится при любом выборе начального приближения y_0, образует интервал $0<\tau<\tau_0$. Правая граница интервала определяется видом матрицы A: $\tau_0=\tau_0(A)$. Итерационный процесс сходится со скоростью геометрической прогрессии, причем знаменатель прогрессии q является функцией τ: $q=q(\tau)$. Существует оптимальное значение $\tau^* \in (0, \tau_0)$, при котором $q(\tau)$ достигает своего наименьшего значения, и, следовательно, скорость сходимости оказывается наибольшей. По мере удаления τ от τ^* и приближения к левой или правой границе интервала $(0, \tau_0)$ сходимость ухудшается: $q(\tau)$ возрастает и стремится снизу к единице.

2. Метод Зейделя. Будем считать, что все диагональные элементы матрицы A отличны от нуля:

$$a_{ii} \neq 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{30}$$

и представим ее в виде суммы трех матриц:

$$A = A^- + D + A^+.$$

Здесь D — диагональная матрица, A^- и A^+ — нижняя и верхняя треугольные матрицы:

$$D = \begin{pmatrix} a_{11} & & 0 \\ & a_{22} & \\ & & \ddots \\ 0 & & a_{nn} \end{pmatrix},$$

$$A^- = \begin{pmatrix} 0 & & & 0 \\ a_{21} & 0 & & \\ a_{31} & a_{32} & 0 & \\ \ldots & \ldots & \ldots & \\ a_{n1} & \ldots & a_{n,n-1} & 0 \end{pmatrix},$$

$$A^+ = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \ldots & a_{1n} \\ & 0 & a_{23} & \ldots & a_{2n} \\ & & \ldots & & \\ & & 0 & & a_{n-1,n} \\ 0 & & & & 0 \end{pmatrix}.$$

Метод Зейделя является неявным стационарным методом,

для которого каноническая форма итерационного соотношения записывается следующим образом:

$$(A^- + D)(y_{k+1} - y_k) + Ay_k = f, \tag{31}$$

т. е. в данном случае $\tau = 1$,

$$B = A^- + D = \begin{vmatrix} a_{11} & & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \\ \vdots & \vdots & \\ a_{n1} & a_{n2} \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}. \tag{32}$$

Рекуррентная формула (31), связывающая y_{k+1} и y_k, допускает другую форму записи:

$$(A^- + D)\, y_{k+1} + A^+ y_k = f. \tag{33}$$

Отсюда видно, что расчет очередной итерации y_{k+1} в методе Зейделя сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с невырожденной треугольной матрицей (32).

Можно доказать сходимость метода Зейделя для систем с симметричными положительно определенными матрицами и для систем, матрицы которых наделены свойством диагонального преобладания. Оба указанных условия являются достаточными.

Матрица A называется матрицей *с диагональным преобладанием*, если ее элементы удовлетворяют неравенствам

$$\sum_{j=1}^{i-1} |a_{ij}| + \sum_{j=i+1}^{n} |a_{ij}| < |a_{ii}|, \qquad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{34}$$

т. е. в каждой строке матрицы модуль диагонального элемента превышает сумму модулей всех остальных элементов.

В отличие от метода простой итерации, свободных параметров, позволяющих регулировать скорость сходимости, в методе Зейделя нет. Такие параметры появляются в более сложных обобщениях метода Зейделя, на которых мы останавливаться не будем.

§ 5. Обусловленность матриц

Матрица системы A и ее правая часть f во многих случаях задаются приближенно. Причины погрешности могут быть самые разные — от ошибок округления при вводе чисел в машину до ошибок измерения, если система связана с обработкой экспериментальных данных. Ошибки вносит

также, как мы видели, вычислительный процесс. Естественно встает вопрос, как все это влияет на точность получаемого решения. Чтобы на него ответить, нам нужно познакомиться с особой характеристикой матриц, которую называют обусловленностью.

Матрица A ставит в соответствие каждому вектору x вектор $y=Ax$. Будем считать, что вектор x принадлежит единичной сфере:

$$|x|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}=1, \tag{35}$$

и подсчитаем длину вектора $y=Ax$:

$$|y|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j\right)^2}=g(x). \tag{36}$$

Функция $g(x)$ непрерывна на ограниченном замкнутом множестве (35); следовательно, она достигает на нем своего наибольшего и наименьшего значений. Введем в рассмотрение соответствующие величины, являющиеся важными характеристиками матрицы A:

$$M=\sup_{|x|=1}|Ax|=\sup_{|x|=1} g(x), \tag{37}$$

$$m=\inf_{|x|=1}|Ax|=\inf_{|x|=1} g(x). \tag{38}$$

Отметим, что $m\geqslant 0$, причем $m=0$ тогда и только тогда, когда матрица A вырождена и однородное уравнение $Ax=0$ имеет нетривиальные решения. Отношение $\mu=M/m\geqslant 1$ называется *обусловленностью матрицы* A.

Используя величины (37), (38), для любого единичного вектора x можно написать двойное неравенство

$$m\leqslant|Ax|\leqslant M, \quad |x|=1. \tag{39}$$

Для произвольного вектора x в силу линейности отображения $y=Ax$ неравенство (39) принимает вид

$$m|x|\leqslant|Ax|\leqslant M|x|. \tag{40}$$

Исследуем с помощью этого неравенства устойчивость решения системы (6) по отношению к малым изменениям входящих в нее величин. Рассмотрим простейший случай, когда матрица системы предполагается заданной точно, а правая часть — приближенно, так что вместо исходной системы (6) мы имеем систему с возмущенной правой

частью $\tilde{f}$. Обозначим ее решение через $\tilde{x}$:

$$A\tilde{x}=\tilde{f}. \tag{41}$$

Представим векторы $\tilde{f}$ и $\tilde{x}$ в виде

$$\tilde{f}=f+\Delta f, \quad \tilde{x}=x+\Delta x$$

и вычтем (6) из (41). В результате получим систему уравнений, связывающую возмущения:

$$A\Delta x=\Delta f. \tag{42}$$

Применяя к системам (6) и (42) неравенства (40) и используя в случае (6) оценку сверху, а в случае (42) снизу, получим

$$|f|\leqslant M|x|, \quad |\Delta f|\geqslant m|\Delta x|.$$

Таким образом,

$$\frac{|\Delta x|}{|x|}\leqslant \mu\frac{|\Delta f|}{|f|}. \tag{43}$$

Величина $|\Delta f|/|f|$ характеризует относительное возмущение правой части, а величина $|\Delta x|/|x|$ — относительную ошибку в решении, вызванную этим возмущением. Обусловленность матрицы μ играет в (43) роль множителя, определяющего максимально возможное увеличение ошибки. Проведенные оценки показывают следующее. Если μ близко к единице, то система хорошо обусловлена: для такой системы относительная ошибка в определении решения сравнима с относительной погрешностью, с которой задается правая часть. По мере увеличения μ чувствительность решения к погрешности в правой части возрастает — система становится плохо обусловленной.

Рассмотрим в качестве примера, иллюстрирующего введенные понятия, следующую систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} x_1+0\cdot x_2&=1,\\ x_1+0{,}01x_2&=1. \end{aligned} \tag{44}$$

Это невырожденная система ($\det A=0{,}01\neq 0$), решение которой имеет вид

$$x_1=1, \quad x_2=0. \tag{45}$$

Изменим немного в (44) правую часть, заменив во втором уравнении 1 на 1,01. В результате получим новую

систему

$$\begin{aligned} x_1 + 0 \cdot x_2 &= 1, \\ x_1 + 0{,}01 x_2 &= 1{,}01, \end{aligned} \tag{46}$$

имеющую решение

$$x_1 = 1, \quad x_2 = 1. \tag{47}$$

Мы видим, что небольшое возмущение правой части системы (44) привело к существенному изменению решения. Это говорит о плохой обусловленности матрицы

$$A = \begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0{,}01 \end{Vmatrix}. \tag{48}$$

Действительно, подсчитав для нее параметр μ, мы убедимся в том, что он большой и разница в решениях систем (44) и (46) согласуется с оценкой (43).

Рассмотрим функцию (36), которая в данном случае имеет вид

$$g(x_1, x_2) = \{x_1^2 + (x_1 + 0{,}01 x_2)^2\}^{1/2} = \\ = \{2x_1^2 + 0{,}02 x_1 x_2 + 0{,}0001 x_2^2\}^{1/2}, \tag{49}$$

и найдем ее наибольшее и наименьшее значения на единичной окружности

$$x_1^2 + x_2^2 = 1. \tag{50}$$

Чтобы решить такую задачу на условный экстремум, положим $x_1 = \cos\varphi$, $x_2 = \sin\varphi$. С переходом к переменной φ условие (50) выполняется автоматически, и задача сводится к задаче на безусловный экстремум для функции одной переменной

$$h(\varphi) = g(\cos\varphi, \sin\varphi) = \\ = \{2\cos^2\varphi + 0{,}02\cos\varphi\sin\varphi + 0{,}0001\sin^2\varphi\}^{1/2} = \\ = \{1{,}00005 + a\cos(2(\varphi - \varphi_0))\}^{1/2}, \tag{51}$$

где

$$a = \sqrt{1 + (0{,}00005)^2} = \sqrt{1 + 0{,}25 \cdot 10^{-8}} \approx 1,$$
$$\varphi_0 = \frac{1}{2}\arccos\frac{0{,}99995}{a}.$$

Отсюда видно, что наибольшее и наименьшее значения функция $h(\varphi)$ достигает соответственно при $\varphi = \varphi_0$ и $\varphi = \varphi_0 + \pi/2$:

$$M = h(\varphi_0) = \sqrt{1{,}00005 + a} \approx \sqrt{2},$$
$$m = h(\varphi_0 + \pi/2) = \sqrt{1{,}00005 - a} \approx 0{,}01/\sqrt{2}.$$

В результате получаем следующее значение обусловленности матрицы (48):

$$\mu = \frac{M}{m} = \frac{\sqrt{1{,}00005 + a}}{\sqrt{1{,}00005 - a}} \approx 200. \qquad (52)$$

Такое большое значение μ делает понятным существенное различие решений систем (44) и (46), несмотря на близость их правых частей. В данном случае

$$f = \{1, 1\}, \quad |f| = \sqrt{2}, \quad x = \{1, 0\}, \quad |x| = 1,$$
$$\Delta f = \{0, 0{,}01\}, \quad |\Delta f| = 0{,}01, \quad \Delta x = \{0, 1\}, \quad |\Delta x| = 1$$

и в соответствии с неравенством (43) получаем

$$\frac{|\Delta x|}{|x|} = 1 < \mu \frac{|\Delta f|}{|f|} \approx \sqrt{2}.$$

Разобранный пример построен специально, однако он наглядно показывает, какие трудности могут возникнуть при решении реальных систем с приближенно заданной правой частью, если они плохо обусловлены.

§ 6. Нормальные решения приближенных систем линейных алгебраических уравнений

Многие прикладные задачи приводят к системам линейных алгебраических уравнений, в которых приближенно задается не только правая часть, но и матрица. Если исходная система является невырожденной, то она остается невырожденной и при достаточно малых возмущениях. Относительная ошибка в решении, которую порождает возмущение, определяется в этом случае его относительной величиной и обусловленностью матрицы системы. Когда возмущение стремится к нулю, ошибка в решении также стремится к нулю, т. е. решение невырожденной системы устойчиво по отношению к малым возмущениям.

Картина существенно усложняется в случае, когда рассматриваемая система является либо переопределенной (число уравнений превышает число неизвестных, $m > n$), либо вырожденной ($\det A = 0$). Дело в том, что теорема Кронекера формулирует условия разрешимости таких систем в виде точных равенств, которые для приближенно заданных величин оказываются лишенными смысла.

Поясним характер возникающих трудностей на простом примере.

Рассмотрим систему

$$\begin{aligned} x_1 + 7x_2 &= 5, \\ \sqrt{2}x_1 + \sqrt{98}x_2 &= \sqrt{50}. \end{aligned} \tag{53}$$

Она является вырожденной (второе уравнение получается из первого умножением на $\sqrt{2}$) и имеет бесчисленное множество решений. В прикладных задачах, приводящих к линейным алгебраическим системам, такая неопределенность, как правило, бывает неприемлема. В этом случае в математическую постановку задачи, исходя из характера рассматриваемой проблемы, включают какое-нибудь дополнительное условие, обеспечивающее единственность решения. Можно, например, искать решение системы (53), ближайшее к некоторому заданному вектору x_0 (*нормальное решение*). Если принять, не ограничивая общности, $x_0 = 0$, то задача сформулируется следующим образом: найти вектор $\bar{x} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2\}$, удовлетворяющий системе (53) и имеющий наименьшую длину:

$$|\bar{x}| \leqslant |x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}. \tag{54}$$

Решение задачи (53), (54) легко найти из простых геометрических соображений. Оно лежит на пересечении прямых

$$\begin{aligned} x_1 + 7x_2 &= 5, \\ 7x_1 - x_2 &= 0. \end{aligned} \tag{55}$$

Первая прямая содержит все решения вырожденной системы (53), а вторая является перпендикуляром к первой, проходящим через начало координат. Согласно (55) нормальное решение системы (53) имеет вид

$$\bar{x}_1 = 0{,}1, \quad \bar{x}_2 = 0{,}7. \tag{56}$$

Предположим, что мы «не заметили» вырожденного характера системы (53) и решили ввести ее в ЭВМ. Для того чтобы записать иррациональные числа в машину, их нужно округлить. Округление «снимает» вырождение, в результате в памяти машины будет сформирована невырожденная система, имеющая единственное решение, которое можно подсчитать и вывести на печать.

Запишем, например, иррациональные числа с точностью до трех знаков. При таком округлении система (53) принимает вид

$$\begin{aligned} x_1 + 7x_2 &= 5, \\ 1{,}41x_1 + 9{,}90x_2 &= 7{,}07. \end{aligned} \tag{57}$$

Для нее

$$\Delta^{(3)} = 0{,}03, \quad \Delta_{x_1}^{(3)} = 0{,}01, \quad \Delta_{x_2}^{(3)} = 0{,}02,$$
$$x_1^{(3)} = 1/3, \quad x_2^{(3)} = 2/3. \tag{58}$$

Здесь верхний индекс (3) указывает число знаков, которое было удержано при записи иррациональных чисел.

Попытаемся теперь повысить точность решения задачи, улучшая аппроксимацию иррациональных чисел. С этой целью построим последовательность аппроксимирующих систем

$$A_k \boldsymbol{x} = \boldsymbol{f}_k, \tag{59}$$

где k — число удерживаемых знаков при записи иррациональных чисел. Рассмотрим, как ведут себя решения этих систем по мере увеличения k. Выше уже было выписано решение $x^{(3)}$ (58). Приведем теперь для сравнения определители и решения систем при $k=50, 200, 400, 600$:

$$\Delta^{(50)} = -3\cdot 10^{-49}, \quad x_1^{(50)} = 9{,}666\ldots, \quad x_2^{(50)} = 0{,}666\ldots,$$
$$\Delta^{(200)} = 2\cdot 10^{-199}, \quad x_1^{(200)} = -5{,}5, \quad x_2^{(200)} = 1{,}5,$$
$$\Delta^{(400)} = 1\cdot 10^{-399}, \quad x_1^{(400)} = 5, \quad x_2^{(400)} = 0,$$
$$\Delta^{(600)} = -2\cdot 10^{-599}, \quad x_1^{(600)} = 8{,}5, \quad x_2^{(600)} = -0{,}5.$$

Мы видим, что определители, отличные от нуля за счет ошибок округления, имеют значения, которые составляют несколько единиц последнего удерживаемого разряда. Что касается решений, то они ведут себя крайне нерегулярно и с увеличением k ни к нормальному, ни к какому-нибудь другому фиксированному решению системы (53) не стремятся.

Округление иррациональных чисел и замену системы (53) системой (59) можно интерпретировать как внесение возмущения. При этом очень мало отличающиеся друг от друга возмущения приводят к существенно отличающимся решениям, т. е. простая замена решения системы (53) решением возмущенной системы делает задачу неустойчивой. Проведенный анализ показывает, что нуждается в уточнении сама постановка задачи о решении приближенно заданных систем линейных алгебраических уравнений. Эта проблема имеет фундаментальное значение для многих задач прикладной математики.

В самом начале этой главы были введены понятия нормы векторов и расстояния между векторами. Прямоугольную матрицу, имеющую m строк и n столбцов, можно

рассматривать как вектор размерности $m \times n$ и в соответствии с формулами (4), (5) ввести понятие нормы и расстояния для матриц:

$$\|A\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}^2}, \tag{60}$$

$$\rho(A_1, A_2) = \|A_1 - A_2\|. \tag{61}$$

Подсчитаем в качестве примера расстояние между матрицами систем (53) и (57). Согласно (60), (61) получаем

$$\rho = \sqrt{(\sqrt{2} - 1{,}41)^2 + (\sqrt{98} - 9{,}90)^2} \approx 0{,}04.$$

Опираясь на понятия нормы и расстояния, уточним понятие приближенно заданной системы. Будем характеризовать такую систему какой-нибудь индивидуальной системой $(\tilde{A}, \tilde{f})$ и точностями β и δ, с которыми задаются матрица и правая часть. При этом любая система (A, f), удовлетворяющая условию

$$\|\tilde{A} - A\| \leqslant \beta, \quad \|\tilde{f} - f\| \leqslant \delta, \tag{62}$$

эквивалентна системе $(\tilde{A}, \tilde{f})$ по точности: с точки зрения доступной информации о системе они неразличимы. Поэтому, говоря о приближенно заданной системе, мы должны рассматривать не индивидуальную систему $(\tilde{A}, \tilde{f})$, а всю совокупность систем $\Sigma_{\beta, \delta}$, эквивалентных ей по точности.

Решение x любой системы $(A, f) \in \Sigma_{\beta, \delta}$ будем называть *допустимым решением* рассматриваемой задачи. Совокупность всех допустимых решений обозначим через $X_{\beta, \delta}$. В случае, когда множество $X_{\beta, \delta}$ — непустое, рассматриваемую приближенную систему назовем *совместной*. По смыслу задачи все допустимые решения совместной системы эквивалентны по точности. Если в $X_{\beta, \delta}$ входят вырожденные совместные системы, то множество допустимых решений $X_{\beta, \delta}$ оказывается неограниченным и содержит элементы, как угодно сильно различающиеся по норме. Это делает необходимым включить в постановку задачи дополнительное правило отбора допустимых решений, без которого ответ оказывается слишком неопределенным.

Во многих случаях в качестве дополнительного условия естественно потребовать, чтобы расстояние до некоторого заданного вектора x_0 было минимальным. Решение, удовлетворяющее такому условию, называют *нормальным решением* приближенной системы и обозначают через $\bar{x}$. Можно

считать, не ограничивая общности, $x_0=0$; тогда получим

$$|\bar{x}| \leqslant |x|, \qquad x \in X_{\beta,\delta}. \tag{63}$$

По определению, нормальное решение само входит в множество допустимых решений $X_{\beta,\delta}$. Это означает, что должны существовать такие матрица $\bar{A}$ и правая часть $\bar{f}$, что

$$\bar{A}\bar{x} = \bar{f}, \tag{64}$$

$$|\bar{A} - A| \leqslant \beta, \ |\bar{f} - f| \leqslant \delta. \tag{65}$$

Можно доказать, что у любой совместной приближенной системы существует единственное нормальное решение $\bar{x}$ и что задача (63) — (65), из которой оно определяется, является устойчивой. Разработаны алгоритмы численного решения этой задачи, однако на их описании мы останавливаться не будем. Приведем лишь в качестве примера решение системы (53). Будем рассматривать ее как приближенную систему, в которой матрица и правая часть задаются с точностями β и δ, тогда нормальные решения задачи при $\beta=\delta=10^{-1}$ и $\beta=\delta=10^{-4}$ имеют вид

$$\bar{x}_1 = 0{,}0968, \quad \bar{x}_2 = 0{,}6944, \quad \beta = \delta = 10^{-1};$$

$$\bar{x}_1 = 0{,}09998, \quad \bar{x}_2 = 0{,}69998, \quad \beta = \delta = 10^{-4}.$$

Мы видим, как по мере увеличения точности, с которой предполагается заданной система, эти решения приближаются к решению (56).

ГЛАВА 6

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Эта глава посвящена математическим вопросам, связанным с проблемой оптимизации. Явно или неявно мы встречаемся с оптимизацией в любой сфере человеческой деятельности от сугубо личного до самого высокого общегосударственного уровня. Экономическое планирование, управление, распределение ограниченных ресурсов, анализ производственных процессов, проектирование сложных объектов всегда должно быть направлено на поиск наилучшего варианта с точки зрения намеченной цели. Это — важнейшее условие научно-технического прогресса.

При небывалом разнообразии задач оптимизации только математика может дать общие методы их решения. Однако для того, чтобы воспользоваться математическим аппаратом, необходимо сначала сформулировать интересующую нас проблему как математическую задачу, придав количественные оценки возможным вариантам, количественный смысл словам «лучше», «хуже».

Многие задачи оптимизации сводятся к отысканию наименьшего (или наибольшего) значения некоторой функции, которую принято называть *целевой функцией* или *критерием качества*. Постановка задачи и методы исследования существенно зависят от свойств целевой функции и той информации о ней, которая может считаться доступной в процессе решения, а также которая известна априори (до опыта, заранее; здесь — до начала решения задачи).

Наиболее просты, с математической точки зрения, случаи, когда целевая функция задается явной формулой и является при этом дифференцируемой функцией. В этом случае для исследования свойств функции, определения направлений ее возрастания и убывания, поиска точек локального экстремума может быть использована производная.

В последние десятилетия в условиях научно-технического прогресса круг задач оптимизации, поставленных практикой, резко расширился. Во многих из них целевая функция не задается формулой, ее значения могут получаться в результате сложных расчетов, браться из эксперимента и т. д. Такие задачи являются более сложными, потому что для них нельзя провести исследование целевой функции с помощью производной. Пришлось уточнять их математическую постановку и разрабатывать специальные методы решения, рассчитанные на широкое применение ЭВМ. Следует также иметь в виду, что сложность задачи существенно зависит от ее размерности, т. е. от числа аргументов целевой функции.

Первые три параграфа данной главы посвящены одномерным задачам оптимизации, в двух последних рассматриваются многомерные задачи. Выделение и подробный разбор одномерных задач имеет определенный смысл. Эти задачи наиболее просты, на них легче понять постановку вопроса, методы решения и возникающие трудности. В ряде случаев, хотя и очень редко, одномерные задачи имеют самостоятельный практический интерес. Однако самое главное заключается в том, что алгоритмы решения многомерных задач оптимизации часто сводятся к последовательному многократному решению одномерных задач и не могут быть поняты без умения решать такие задачи.

§ 1. Задача о наилучшей консервной банке

Перед вами поставили задачу: указать наилучший вариант консервной банки фиксированного объема V, имеющей обычную форму прямого кругового цилиндра. Получив такое задание, вы неизбежно должны спросить: «По какому признаку следует сравнивать банки между собой, какая банка считается наилучшей?» Иными словами, вы попросите указать цель оптимизации.

Рассмотрим два варианта этой задачи.

1. Наилучшая банка должна иметь наименьшую поверхность S. (На ее изготовление идет наименьшее количество жести.)

2. Наилучшая банка должна иметь наименьшую длину шва. (Швы нужно сва[illegible] мы хотим сделать эту [illegible] минимальной.)

[illegible] этой з[illegible] для объема

банки, площади ее поверхности и длины швов:

$$V=\pi r^2 h,\quad S=2\pi r^2+2\pi rh,\quad l=4\pi r+h. \tag{1}$$

Объем банки задан, это устанавливает связь между радиусом r и высотой h. Выразим высоту через радиус: $h=V/(\pi r^2)$ и подставим полученное выражение в формулы для поверхности и длины швов. В результате получим

$$S(r)=2\pi r^2+\frac{2V}{r},\qquad 0<r<\infty, \tag{2}$$

$$l(r)=4\pi r+\frac{V}{\pi r^2},\qquad 0<r<\infty. \tag{3}$$

Таким образом, с математической точки зрения, задача о наилучшей консервной банке сводится к определению такого значения r, при котором достигает своего наименьшего значения в одном случае функция $S(r)$, в другом — функция $l(r)$.

Рассмотрим первый вариант задачи. Вычислим производную функции $S(r)$:

$$S'(r)=4\pi r-\frac{2V}{r^2}=\frac{2}{r^2}(2\pi r^3-V) \tag{4}$$

и исследуем ее знак. При $0<r<r_1=\sqrt[3]{V/(2\pi)}$ производная отрицательна и функция $S(r)$ убывает, при $r_1<r<\infty$ производная положительна и функция $S(r)$ возрастает. Следовательно, своего наименьшего значения эта функция достигает в точке $r=r_1$, в которой ее производная обращается в нуль. График функции $S(r)$, иллюстрирующий проведенный анализ, показан на рис. 14.

Итак, радиус и высота банки, наилучшие с точки зрения условия минимальности $S(r)$, определяются формулами

$$r_1=\sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}},\quad h_1=2r_1, \tag{5}$$

при этом

$$S(r_1)=3\sqrt[3]{2\pi V^2}\leqslant S(r). \tag{6}$$

Рассмотрим теперь задачу во второй постановке. Продифференцируем функцию $l(r)$:

$$l'(r)=4\pi-\frac{2V}{r^3}=\frac{4}{r^3}(\pi^2 r^3-V). \tag{7}$$

Как и в предыдущем случае, при $0<r<r_2=\sqrt[3]{V/\pi^2}$ производная отрицательна, и функция $l(r)$ убывает,

$r_2 < r < \infty$ производная положительна и функция $l(r)$ возрастает. Следовательно, своего наименьшего значения эта функция достигает в точке $r = r_2$, в которой ее производная обращается в нуль. График функции показан на рис. 15.

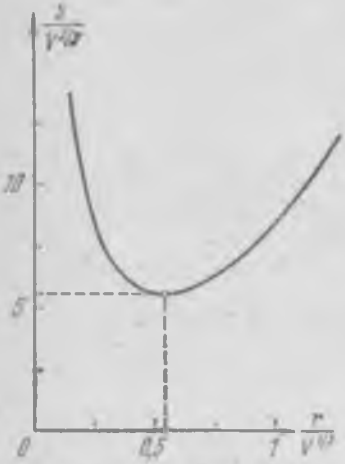


Рис. 14. График функции $S(r)$.

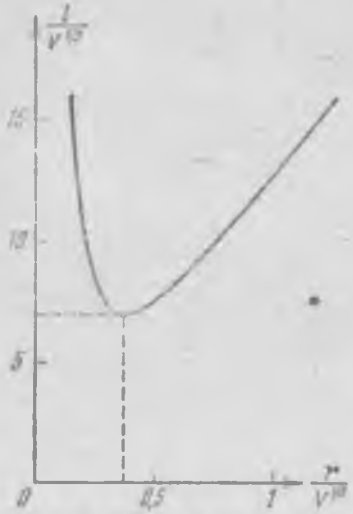


Рис. 15. График функции $l(r)$.

Итак, радиус и высота банки, наилучшие с точки зрения условия минимальности $l(r)$, определяются формулами

$$r_2 = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}, \qquad h_2 = 2\pi r_2, \tag{8}$$

при этом

$$l(r_2) = 3\sqrt[3]{4\pi V} \leqslant l(r). \tag{9}$$

Мы видим, что при разных критериях оптимизации получаются существенно разные ответы. В первом случае (5) высота «наилучшей» банки равна ее диаметру, во втором (8) она в π раз больше диаметра.

§ 2. Одномерные задачи оптимизации

После обсуждения простого, но характерного примера рассмотрим общие вопросы постановки и методов решения одномерных задач оптимизации. С математической точки зрения такую задачу можно сформулировать следующим образом.

Найти наименьшее (или наибольшее) значение целевой функции $f(x)$, заданной на множестве X. Определить значение переменной $x \in X$, при котором она принимает свое экстремальное значение.

В математическом анализе при изучении свойств функций, непрерывных на отрезке, доказывается следующая теорема.

Теорема Вейерштрасса. *Всякая функция $f(x)$, непрерывная на отрезке $[a, b]$, принимает на этом отрезке свое наименьшее и наибольшее значения, т. е. на отрезке $[a, b]$ существуют такие точки x_1, x_2, что для любого $x \in [a, b]$ выполняются неравенства*

$$f(x_1) \leqslant f(x) \leqslant f(x_2). \tag{10}$$

Не исключается, в частности, возможность того, что наименьшее или наибольшее значение достигается сразу в нескольких точках. Вы легко можете убедиться в этом, рассмотрев в качестве примера функцию $y=\sin x$ на отрезке $[0, 4\pi]$. Она достигает своего наименьшего значения, равного — 1, сразу в двух точках: $x=3\pi/2$, $x=7\pi/2$. Наибольшее значение, равное 1, достигается тоже в двух точках: $x=\pi/2$, $x=5\pi/2$.

Теорема Вейерштрасса играет в данном случае роль теоремы существования: согласно этой теореме задача оптимизации, в которой целевая функция $f(x)$ задана и непрерывна на отрезке, всегда имеет решение.

Теперь нам предстоит обсудить методы решения задач оптимизации. В этом параграфе мы рассмотрим наиболее простой класс задач, аналогичных задаче о наилучшей консервной банке. При их исследовании мы будем предполагать, что целевая функция $f(x)$ дифференцируема на отрезке $[a, b]$ и имеется возможность найти явное выражение для ее производной $f'(x)$.

Точки, в которых производная обращается в нуль, называются *критическими* или *стационарными точками* функции $f(x)$. Если интерпретировать производную как скорость изменения функции, то в критических точках эта скорость равна нулю, изменение функции на мгновение «останавливается».

Функция $f(x)$ может достигать своего наименьшего (наибольшего) значения либо в одной из двух граничных точек отрезка $[a, b]$, либо в какой-нибудь его внутренней точке. В последнем случае такая точка обязательно должна быть критической, это необходимое условие экстремума. Учиты-

вая изложенное, можем сформулировать следующее п р а в и л о решения задачи оптимизации для рассматриваемого класса функций.

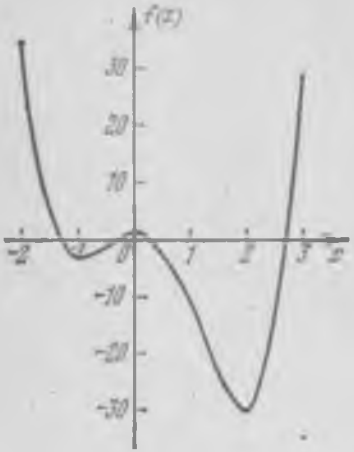


Рис. 16. График функции $f(x)=3x^4-4x^3-12x^2+2$.

Для того чтобы определить наименьшее и наибольшее значения дифференцируемой функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$, нужно найти все ее критические точки на данном отрезке, присоединить к ним граничные точки a и b и во всех этих точках сравнить значения функции. Наименьшее и наибольшее из них дадут наименьшее и наибольшее значения функции для всего отрезка.

Поскольку граничные точки a и b искать не нужно, то с технической точки зрения все сводится к определению критических точек, которые являются корнямнуравнения

$$f'(x)=0. \tag{11}$$

Для иллюстрации изложенного правила решения задачи оптимизации рассмотрим на отрезке $[-2, 3]$ функцию

$$f(x)=3x^4-4x^3-12x^2+2. \tag{12}$$

Вычислим ее производную:

$$f'(x)=12x^3-12x^2-24x.$$

Таким образом, уравнение (11) для определения критических точек в данном случае принимает вид

$$x^3-x^2-2x=0. \tag{13}$$

Все корни этого уравнения: $x_1=-1$, $x_2=0$, $x_3=2$ принадлежат исходному отрезку. Добавляя к ним граничные точки: $a=-2$, $b=3$, вычислим соответствующие значения функции (12):

$$f(-2)=34, \quad f(-1)=-3, \quad f(0)=2,$$
$$f(2)=-30, \quad f(3)=29.$$

Из сравнения этих чисел следует, что наименьшее значение функции $f(x)$ достигается в одной из критических точек $x=2$, а наибольшее — в граничной точке $x=-2$, причем

$$f_{\min} = f(2) = -30,$$
$$f_{\max} = f(-2) = 34.$$

График функции (12), иллюстрирующий проведенное исследование, показан на рис. 16.

В простейших случаях, как в задаче о консервной банке или в рассмотренном примере (12), нули производной удается найти аналитически. На это в первую очередь и рассчитан данный метод, хотя не исключается возможность численного решения уравнения (11). Однако при этом важно найти все критические точки, иначе мы рискуем допустить ошибку, пропустив истинное наименьшее или наибольшее значение функции.

§ 3. Численное решение одномерных задач оптимизации

Рассмотрим следующий пример. Химический завод производит некоторое вещество. Выход интересующего нас продукта определяется температурой: $y=f(T)$. Температуру можно варьировать в определенных пределах: $T_1 \leqslant T \leqslant T_2$. Вид функции f заранее не известен, он зависит от используемого сырья. Получив очередную партию сырья, нужно найти температуру T, при которой наиболее выгодно вести производство, т. е. функция $f(T)$ достигает своего наибольшего значения.

С математической точки зрения мы имеем типичную одномерную задачу оптимизации, сформулированную в начале предыдущего параграфа. В то же время между этой задачей и задачей о консервной банке имеется существенное различие. В данном случае нет никакой формулы для целевой функции $f(T)$. Чтобы определить ее значение при некоторой температуре T, нужно провести опыт либо в лаборатории (если это возможно), либо прямо в производственных условиях. Совершенно ясно, что возможно лишь конечное число измерений и тем самым функция $f(T)$ будет известна нам в конечном числе точек. Значений ее производной мы вообще определить не можем. Строго говоря, мы даже не знаем, существует ли у нее производная, хотя опыт таких исследований и здравый смысл говорят, что функция $f(T)$, по-видимому, дифференцируема-

Нам остается добавить, что каждое измерение требует времени, а задерживать производство нельзя. Поэтому необходимо получить ответ на поставленный вопрос после небольшого числа измерений, т. е. по значениям функции $y=f(T)$ в нескольких точках.

Возможны также задачи оптимизации, в которых целевая функция $y=f(x)$ находится в результате численного решения некоторой математической задачи. Данный случай по своему характеру весьма близок к предыдущему: мы не имеем явной формулы для целевой функции, но можем определить ее значение для любого аргумента $x \in [a, b]$. Ясно, что при этом в ходе решения задачи нам окажется непосредственно доступной информация о целевой функции в конечном числе точек.

Итак, обсудим математические вопросы, связанные со следующей постановкой одномерной задачи оптимизации: определяя значения непрерывной функции $f(x)$ в некотором конечном числе точек отрезка $[a, b]$, нужно приближенно найти ее наименьшее (или наибольшее) значение на данном отрезке.

Возможны разные подходы к решению этой задачи. Рассмотрим сначала метод, идея которого наиболее проста и естественна.

1. Метод равномерного распределения точек по отрезку. Возьмем некоторое целое число n, вычислим шаг $h = (b-a)/n$ и определим значения функции $f(x)$ в точках $x_k = a+kh$ $(k=0, 1, \ldots, n)$: $y_k=f(x_k)$. После этого найдем среди полученных чисел наименьшее:

$$m_n = \min(y_0, y_1, \ldots, y_n),$$
$$m_n \geqslant m = \min f(x), \quad x \in [a, b].$$

Число m_n можно приближенно принять за наименьшее значение функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$. Благодаря непрерывности функции $f(x)$ имеем

$$\lim_{n\to\infty} m_n = m = \min f(x),$$

т. е. с увеличением числа точек n ошибка, которую мы допускаем, принимая m_n за m, стремится к нулю.

Какое же n нужно взять, чтобы погрешность в определении наименьшего значения функции $\delta_n = m_n - m$ не превышала заданной точности ε, т. е. чтобы $\delta_n \leqslant \varepsilon$? Это — обычный вопрос, который всегда встает при приближенном решении математических задач. Вспомним, что для метода

вилки, благодаря двухсторонней оценке корня, мы легко получили условие достижения точности ε в виде неравенства (2.24).

Для данной задачи ситуация оказывается более сложной. Если нам известно только то, что функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$, то ответить на поставленный

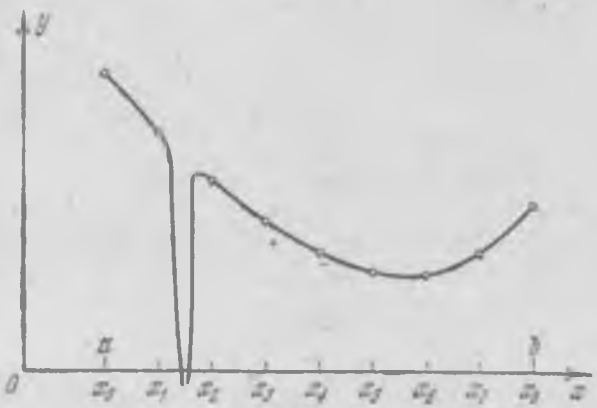


Рис. 17. Пример, иллюстрирующий трудности, которые могут возникнуть при приближенном определении наименьшего значения функции по ее значениям в нескольких точках.

вопрос нельзя. Эта трудность не связана с предложенным способом выбора точек x_k, она носит принципиальный характер. Какое бы n мы ни взяли и как бы ни выбирали n точек на отрезке $[a, b]$, всегда можно указать такую непрерывную функцию, что для нее m_n будет отличаться от m больше чем на ε.

Справедливость этого утверждения иллюстрирует рис. 17. На нем приведен график некоторой непрерывной функции. Допустим, что, желая найти ее наименьшее значение, мы взяли $n=8$. Определяя значения функции $y_k=f(x_k)$ в точках x_k ($k=0, 1, \ldots, 8$) (на рис. значения $y_k=f(x_k)$ отмечены кружочками), получим

$$m_8 = \min(y_0, y_1, \ldots, y_8) = y_6 = f(x_6).$$

Величину $m_8 = y_6$ согласно описанному методу следует приближенно принять за наименьшее значение функции m.

Представьте, что у нас нет перед глазами рис. 17 (как и предполагает постановка задачи), а известны только 9 чисел y_k. По ним невозможно установить, что функция

$f(x)$ имеет между точками x_1 и x_2 узкий «язык», который опускается гораздо ниже $y_6=m_6$. Из-за небольшого числа точек мы его пропустим. Если взять большее n, то данный «язык» обнаружится, но может оказаться незамеченным какой-нибудь другой еще более узкий «язык». При отсутствии дополнительной информации о свойствах функции $f(x)$, о том, насколько «резкими» могут быть ее изменения, сомнения останутся, какое бы большое число точек мы ни взяли.

Дать строго обоснованную оценку числа точек n, необходимого для решения задачи с точностью ε ($\delta_n \leqslant \varepsilon$), можно только, сужая класс рассматриваемых функций. Предположим, например, что функция $y=f(x)$ не просто непрерывна, а удовлетворяет условию Липшица с известной постоянной α, тогда легко получить следующее неравенство для нужного числа точек n в данном методе:

$$n \geqslant \frac{\alpha}{\varepsilon}(b-a). \tag{14}$$

Однако и этот результат малоэффективен при отсутствии явной формулы для функции $f(x)$. Он может быть использован, если имеется априорная информация о величине постоянной Липшица α. В противном случае предположение о справедливости для целевой функции условия Липшица и оценка константы α, входящей в (14), носит характер гипотезы, которую, как правило, невозможно проверить. (Подумайте сами, как это сделать в задаче о химическом производстве, если каждое значение целевой функции $f(T)$ получается в результате экспериментальных измерений, а условие Липшица, с точки зрения математического определения, нужно проверять для любой пары аргументов из рассматриваемой области.) Поэтому при решении вопроса о числе точек и точности важно максимально полно использовать всю дополнительную информацию о свойствах целевой функции, о степени ее гладкости, вытекающую из характера и особенностей задачи. Не последнюю роль играет и такой фактор, как опыт, интуиция исследователя.

2. Метод распределения точек по отрезку, учитывающий результаты вычисления целевой функции. Для метода, который был описан, характерно равномерное распределение «пробных» точек x_k по отрезку $[a, b]$. Их положение строго фиксировано заранее и никак не зависит от информации о функции $f(x)$, которую мы получаем по мере вычисления чисел $y_k=f(x_k)$. Такой подход дает воз-

можность внимательно просмотреть весь отрезок. Он помогает наиболее надежно избежать пропуска какого-нибудь узкого «языка» у целевой функции. В этом бесспорное достоинство метода.

Однако недаром говорят, что наши недостатки — это продолжение наших достоинств. Распределяя точки x_k равномерно, мы уделяем одинаковое внимание всем участкам отрезка: тем, где целевая функция велика, и тем, в направлении которых она убывает. Это существенно удлиняет расчеты и затягивает исследование.

Организацию вычислений по такой схеме можно сравнить с поведением в лесу неопытного грибника. В поисках грибов он ходит по всему лесу, не чувствуя разницы между грибными и негрибными местами. В результате ему приходится тратить много сил и времени понапрасну на осмотр негрибных мест. Совершенно иначе ведет себя опытный грибник. Он подолгу задерживается на грибных местах и осматривает их особенно внимательно, а через негрибные места проходит быстро, не тратя на них лишнего времени.

Чтобы организовать поиск наименьшего значения функции по методу «опытного грибника», нужно отказаться от предписанного заранее выбора точек x_k, а выбирать очередную точку с учетом информации, которую мы уже получили о функции $f(x)$ в результате ее вычисления в предыдущих точках. При этом основное внимание следует уделять тем участкам отрезка $[a, b]$, где вычисления дают малые значения функции, просматривая другие участки более бегло. Реализовать эту идею можно, например, следующим образом.

Вычислим значения функции $f(x)$ в двух граничных точках $x_0=a$ и $x_1=b$: $y_0=f(x_0)$, $y_1=f(x_1)$. После этого следующую точку x_2 выберем ближе к тому концу отрезка, на котором функция принимает меньшее значение. Ее положение определим соотношением между числами y_0 и y_1: чем больше разница между ними, тем сильнее будет сдвиг точки x_2 в соответствующую сторону. Точку x_3 выберем с учетом взаимного расположения точек x_0, x_1, x_2 и соотношения между числами y_0, y_1, y_2 и т. д. Мы не будем останавливаться на описании возможных алгоритмов выбора очередной точки x_k по информации, полученной в результате вычисления целевой функции на предыдущих шагах,— это специальный вопрос. Отметим лишь, что исследования в данной области продолжаются, алгоритмы совершенствуются, и пока рано говорить об окончательном решении задачи.

3. Специальные методы. Воспользуемся еще раз примером о сборе грибов, чтобы поставить новые вопросы о методах решения задачи оптимизации. Грибник может попасть в данный лес впервые и ничего не знать о нем заранее, кроме одного: грибы есть. Возможен и другой случай. Человек приходит в лес, который он уже немного знает. Его поведение в первом и во втором случае будет различным. Причем, если он сумеет правильно воспользоваться известными ему особенностями леса, то наполнит корзину грибами гораздо быстрее.

До сих пор, обсуждая задачи оптимизации, мы говорили об универсальных методах их решения. Однако во многих случаях из характера задачи вытекает какая-то дополнительная информация о свойствах целевой функции. Это может быть использовано для разработки специальных алгоритмов. Такой подход позволяет существенно сократить объем вычислений и получить ответ наиболее эффективным способом.

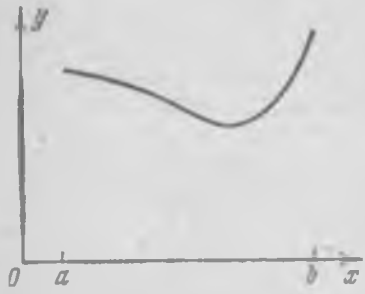


Рис. 18. Пример функции, имеющей один минимум.

В качестве примера рассмотрим случай, когда нам известно заранее, что целевая функция $y=f(x)$ имеет на отрезке $[a, b]$ только один минимум. График такой функции показан на рис. 18.

Для решения задачи в этом случае можно воспользоваться следующим методом. Возьмем некоторый шаг h и будем последовательно вычислять значения функции $f(x)$ в точках $x_0=a$, $x_1=a+h$, $x_2=a+2h$, . . ., сравнивая получаемые числа y_0, y_1, y_2, ... Сначала они будут убывать: $y_0 > y_1 > y_2 > \ldots$, однако в дальнейшем найдется такая точка $x_k=a+kh$, что для значения в ней функции $y_k=f(x_k)$ справедливы неравенства $y_{k-1} > y_k$, $y_{k+1} \geqslant y_k$. Это означает, что наименьшее значение функции достигается на отрезке $[x_{k-1}, x_{k+1}]$ и его приближенно можно принять равным $y_k=f(x_k)$. Если требуемая точность в решении задачи еще не обеспечена, то нужно уменьшить шаг h и повторить описанную процедуру для отрезка $[x_{k-1}, x_{k+1}]$.

Задача об оптимальной температуре для химического процесса часто относится к задачам подобного типа. График функции $f(T)$ для многих химических реакций имеет

вид кривой на рис. 18, но только перевернутой: при увеличении температуры T функция сначала возрастает, а потом, пройдя через максимум, начинает убывать. Нам нужно найти этот максимум, для чего можно воспользоваться описанной выше процедурой. Она потребует небольшого числа измерений функции $f(T)$. То, что мы ищем максимум, а не минимум, не имеет принципиального значения с точки зрения метода, просто все неравенства изменят свои знаки на противоположные.

§ 4. Многомерные задачи оптимизации

До сих пор мы обсуждали одномерные задачи оптимизации, в которых целевая функция зависела только от одного аргумента. Однако подавляющее число реальных задач оптимизации, представляющих практический интерес, являются многомерными: в них целевая функция зависит от нескольких аргументов, причем иногда их число может быть весьма большим.

Вспомним, например, задачу о химическом производстве. Мы отметили, что в ней целевая функция зависит от температуры, и при определенном ее выборе производительность (выход интересующего нас продукта) оказывается максимальной. Однако, наряду с температурой, производительность зависит также от давления, соотношения между концентрациями вводимого сырья, катализаторов и ряда других факторов. Таким образом, задача выбора наилучших условий химического производства — это типичная многомерная задача оптимизации.

Математическая постановка таких задач аналогична их постановке в одномерном случае: ищется наименьшее (наибольшее) значение целевой функции, заданной на некотором множестве E возможных значений ее аргументов. В случае, когда целевая функция непрерывна, а множество E является замкнутой ограниченной областью, остается справедливой теорема Вейерштрасса. Тем самым выделяется класс задач оптимизации, для которых гарантировано существование решения. В дальнейшем мы всегда будем предполагать, не оговаривая этого особо, что все рассматриваемые задачи принадлежат этому классу.

Как и в одномерном случае, характер задачи и соответственно возможные методы решения существенно зависят от той информации о целевой функции, которая нам доступна в процессе ее исследования. В одних случаях целе-

вая функция задается аналитической формулой, являясь при этом дифференцируемой функцией. Тогда можно вычислить ее частные производные, получить явное выражение для градиента, определяющего в каждой точке направления

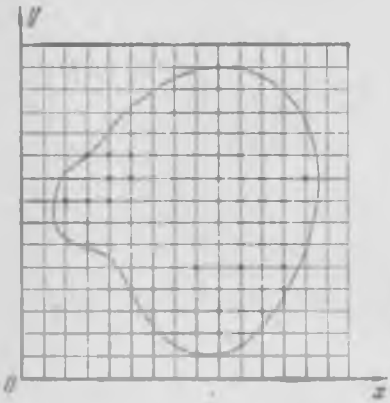


Рис. 19. Построение сетки с шагом h и выбор «пробных» точек в узлах сетки для приближенного определения наименьшего значения функции двух переменных.

возрастания и убывания функции, и использовать эту информацию для решения задачи. В других случаях никакой формулы для целевой функции нет, а имеется лишь возможность определить ее значение в любой точке рассматриваемой области (с помощью расчетов, в результате эксперимента и т. д.). В таких задачах в процессе решения мы фактически можем найти значения целевой функции лишь в конечном числе точек, и по этой информации требуется приближенно установить ее наименьшее значение для всей области.

Многомерные задачи, естественно, являются более сложными и трудоемкими, чем одномерные, причем обычно трудности при их решении возрастают при увеличении размерности. Для того чтобы вы лучше почувствовали это, возьмем самый простой по своей идее приближенный метод поиска наименьшего значения функции, который уже обсуждался для одномерных задач в § 3. Покроем рассматриваемую область сеткой с шагом h (рис. 19) и определим значения функции в ее узлах. Сравнивая полученные числа между собой, найдем среди них наименьшее и примем его приближенно за наименьшее значение функции для всей области.

Как мы уже говорили выше, данный метод используется для решения одномерных задач. Иногда он применяется

также для решения двумерных, реже трехмерных задач. Однако для задач большей размерности он практически непригоден из-за слишком большого времени, необходимого для проведения расчетов.

Действительно, предположим, что целевая функция зависит от пяти переменных, а область определения является пятимерным кубом, каждую сторону которого при построении сетки мы делим на 40 частей. Тогда общее число узлов сетки будет равно $41^5 \approx 10^8$. Пусть вычисление значения функции в одной точке требует 1000 арифметических операций (это немного для функции пяти переменных). В таком случае общее число операций составит 10^{11}. Если в нашем распоряжении имеется ЭВМ с быстродействием 1 млн. операций в секунду, то для решения задачи с помощью данного метода потребуется 10^5 секунд, что превышает сутки непрерывной работы. Добавление еще одной независимой переменной увеличит это время в 40 раз.

Проведенная оценка показывает, что для больших задач оптимизации метод сплошного перебора непригоден. Иногда сплошной перебор заменяют случайным поиском. В этом случае точки сетки просматриваются не подряд, а в случайном порядке. В результате поиск наименьшего значения целевой функции существенно ускоряется, но теряет свою надежность.

Перейдем к обсуждению методов, позволяющих вести поиск наименьшего значения функции целенаправленно.

1. Метод покоординатного спуска. Пусть нужно найти наименьшее значение целевой функции $u=f(M)=f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Здесь через M обозначена точка n-мерного пространства с координатами $x_1, x_2, \ldots, x_n$: $M=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Выберем какую-нибудь начальную точку $M_0=(x_{10}, x_{20}, \ldots, x_{n0})$ и рассмотрим функцию f при фиксированных значениях всех переменных, кроме первой: $f(x_1, x_{20}, x_{30}, \ldots, x_{n0})$. Тогда она превратится в функцию одной переменной x_1. Изменяя эту переменную, будем двигаться от начальной точки $x_1=x_{10}$ в сторону убывания функции, пока не дойдем до ее минимума при $x_1=x_{11}$, после которого она начинает возрастать. Точку с координатами $(x_{11}, x_{20}, x_{30}, \ldots, x_{n0})$ обозначим через M_1, при этом $f(M_0) \geqslant (M_1)$.

Фиксируем теперь переменные: $x_1=x_{11}$, $x_3=x_{30}$, $\ldots$, $x_n=x_{n0}$ и рассмотрим функцию f как функцию одной переменной x_2: $f(x_{11}, x_2, x_{30}, \ldots, x_{n0})$. Изменяя x_2, будем опять двигаться от начального значения $x_2=x_{20}$ в сторону убывания функции, пока не дойдем до минимума при

$x_2=x_{21}$. Точку с координатами $\{x_{11}, x_{21}, x_{30}, \ldots, x_{n0}\}$ обозначим через M_2, при этом $f(M_1)\geqslant f(M_2)$.

Проведем такую же минимизацию целевой функции по переменным $x_3, x_4, \ldots, x_n$. Дойдя до переменной x_n, снова вернемся к x_1 и продолжим процесс. Эта процедура вполне оправдывает название метода. С ее помощью мы построим последовательность точек M_0, M_1, M_2, ..., которой соответствует монотонная последовательность значений функции $f(M_0)\geqslant f(M_1)\geqslant f(M_2)\geqslant\ldots$ Обрывая ее на некотором шаге k, можно приближенно принять значение функции $f(M_k)$ за ее наименьшее значение в рассматриваемой области.



Рис. 20. Поиск наименьшего значения функции методом покоординатного спуска.

Отметим, что данный метод сводит задачу поиска наименьшего значения функции нескольких переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации. Если целевая функция $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ задана явной формулой и является дифференцируемой, то мы можем вычислить ее частные производные и использовать их для определения направления убывания функции по каждой переменной и поиска соответствующих одномерных минимумов. В противном случае, когда явной формулы для целевой функции нет, одномерные задачи следует решать с помощью методов, описанных в § 3.

На рис. 20 изображены линии уровня некоторой функции двух переменных $u=f(x, y)$. Вдоль этих линий функция сохраняет постоянные значения, равные 1, 3, 5, 7, 9. Показана траектория поиска ее наименьшего значения, которое достигается в точке O, с помощью метода покоординатного спуска. При этом нужно ясно понимать, что рисунок служит только для иллюстрации метода. Когда мы приступаем к решению реальной задачи оптимизации, такого рисунка, содержащего в себе готовый ответ, у нас, конечно, нет.

2. Метод градиентного спуска. Рассмотрим функцию f, считая для определенности, что она зависит от трех переменных x, y, z. Вычислим ее частные производные $\partial f/\partial x$,

$\partial f/\partial y$, $\partial f/\partial z$ и образуем с их помощью вектор, который называют *градиентом* функции:

$$\operatorname{grad} f(x, y, z) = \frac{\partial f}{\partial x}(x, y, z)\, i + \frac{\partial f}{\partial y}(x, y, z)\, j + \frac{\partial f}{\partial z}(x, y, z)\, k.$$

Здесь i, j, k — единичные векторы, параллельные координатным осям. Частные производные характеризуют изменение функции f по каждой независимой переменной в отдельности. Образованный с их помощью вектор градиента дает общее представление о поведении функции в окрестности точки (x, y, z). Направление этого вектора является направлением наиболее быстрого возрастания функции в данной точке. Противоположное ему направление, которое часто называют *антиградиентным*, представляет собой направление наиболее быстрого убывания функции. Модуль градиента

$$|\operatorname{grad} f(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}(x, y, z)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}(x, y, z)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}(x, y, z)\right)^2}$$

определяет скорость возрастания и убывания функции в направлении градиента и антиградиента. Для всех остальных направлений скорость изменения функции в точке (x, y, z) меньше модуля градиента. При переходе от одной точки к другой как направление градиента, так и его модуль, вообще говоря, меняются. Понятие градиента естественным образом переносится на функции любого числа переменных.

Перейдем к описанию метода градиентного спуска. Основная его идея состоит в том, чтобы двигаться к минимуму в направлении наиболее быстрого убывания функции, которое определяется антиградиентом. Эта идея реализуется следующим образом.

Выберем каким-либо способом начальную точку, вычислим в ней градиент рассматриваемой функции и сделаем небольшой шаг в обратном, антиградиентном направлении. В результате мы придем в точку, в которой значение функции будет меньше первоначального. В новой точке повторим процедуру: снова вычислим градиент функции и сделаем шаг в обратном направлении. Продолжая этот процесс, мы будем двигаться в сторону убывания функции. Специальный выбор направления движения на каждом шаге позволяет надеяться на то, что в данном случае приближение к наименьшему значению функции будет более быстрым, чем в методе покоординатного спуска.

Метод градиентного спуска требует вычисления градиента целевой функции на каждом шаге. Если она задана аналитически, то это, как правило, не проблема: для частных производных, определяющих градиент, можно получить явные формулы. В противном случае частные производные в нужных точках приходится вычислять приближенно, заменяя их соответствующими разностными отношениями:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(x_1, \ldots, x_i + \Delta x_i, \ldots, x_n) - f(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_n)}{\Delta x_i}.$$

Отметим, что при таких расчетах Δx_i нельзя брать слишком малым, а значения функции нужно вычислять с достаточно высокой степенью точности, иначе при вычислении разности

$$\Delta f = f(x_1, \ldots, x_i + \Delta x_i, \ldots, x_n) - f(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_n)$$

будет допущена большая ошибка.

На рис. 21 изображены линии уровня той же функции двух переменных $u = f(x, y)$, что и на рис. 20, и приведена



Рис. 21. Поиск наименьшего значения функции методом градиентного спуска.



Рис. 22. Поиск наименьшего значения функции методом наискорейшего спуска.

траектория поиска ее минимума с помощью метода градиентного спуска. Сравнение рис. 20 и 21 показывает, насколько более эффективным является метод градиентного спуска.

3. Метод наискорейшего спуска. Вычисление градиента на каждом шаге, позволяющее все время двигаться в направлении наиболее быстрого убывания целевой функции,

может в то же время замедлить вычислительный процесс. Дело в том, что подсчет градиента — обычно гораздо более сложная операция, чем подсчет самой функции. Поэтому часто пользуются модификацией градиентного метода, получившей название метода наискорейшего спуска.

Согласно этому методу после вычисления в начальной точке градиента функции делают в направлении антиградиента не маленький шаг, а движутся до тех пор, пока функция убывает. Достигнув точки минимума на выбранном направлении, снова вычисляют градиент функции и повторяют описанную процедуру. При этом градиент вычисляется гораздо реже, только при смене направлений движения.

На рис. 22 показана траектория поиска наименьшего значения целевой функции по методу наискорейшего спуска. Функция выбрана та же, что и на рис. 20, 21. Хотя траектория ведет к цели не так быстро, как на рис. 21, экономия машинного времени за счет более редкого вычисления градиента может быть весьма существенной.

4. Проблема «оврагов». Мы рассказали о трех вариантах методов спуска и показали на рис. 20—22 как хорошо они работают. В результате у вас могло сложиться впечатление, что проблема решена. На самом деле это не так. Все было хорошо потому, что был выбран «удобный» пример. Но посмотрите на рис. 23. На нем также показаны линии уровня некоторой функции, однако их конфигурация отличается от рис. 20—22. Линии уровня сильно вытянуты в одном направлении и сплющены в другом. Они напоминают рельеф местности с оврагом. Этот случай крайне неудобен для описанных выше методов.

Действительно, попытаемся найти наименьшее значение такой функции с помощью градиентного спуска. Двигаясь все время в направлении антиградиента, мы быстро спустимся на дно «оврага» и, поскольку движение идет хотя и маленькими, но конечными шагами, проскочим его. Оказавшись на противоположной стороне «оврага» и вычислив там градиент функции, мы будем вынуждены развернуться почти на 180° и сделать один или несколько шагов в обратном направлении. При этом мы снова проскочим дно «оврага» и вернемся на его первоначальную сторону. Продолжая этот процесс, мы вместо того, чтобы двигаться по дну «оврага» в сторону его понижения, будем совершать зигзагообразные скачки поперек «оврага», почти не приближаясь к цели. Таким образом, в случае «оврага» (этот нематематический тер-

мин прочно закрепился в литературе) описанные выше методы спуска оказываются неэффективными.

Для борьбы с «оврагами» был предложен ряд специальных приемов. Один из них заключается в следующем. Из двух близких точек совершают градиентный спуск на дно «оврага». Потом соединяют найденные точки прямой и делают вдоль нее большой (овражный) шаг. Из найденной точки снова спускаются на дно «оврага» и делают второй



Рис. 23. Поиск наименьшего значения функции в случае «оврага».

овражный шаг. В результате, двигаясь достаточно быстро вдоль «оврага», приближаемся к искомому наименьшему значению целевой функции (см. рис. 23). Такой метод достаточно эффективен для функций двух переменных, однако при большем числе переменных могут возникнуть трудности.

Все описанные выше методы приспособлены к случаю, когда наименьшее значение функции достигается внутри рассматриваемой области, и становятся малоэффективными, если наименьшее значение достигается на границе или вблизи нее. Для решения таких задач приходится разрабатывать специальные методы. Мы не будем на них останавливаться. Вам должно быть и без того ясно, что большое число специальных методов — это признак слабости, а не силы. Ведь, приступая к решению практической задачи, мы, как правило, не знаем всех ее особенностей и не можем сразу выбрать наиболее эффективный метод.

5. Проблема многоэкстремальности. Посмотрите на рис. 20—23 и сравните их с рис. 24. Первые четыре рисунка относятся к функциям,* имеющим только один минимум. Поэтому, откуда бы ни начинался поиск, мы придем в конце

концов к нужной точке. На рис. 24 приведены линии уровня функции с двумя локальными минимумами в точках O_1 и O_2. Такие функции принято называть *многоэкстремальными*. Сравнивая между собой значения функции в точках O_1 и O_2: $f_1=3$, $f_2=1$, находим, что наименьшее значение функция достигает в точке O_2.

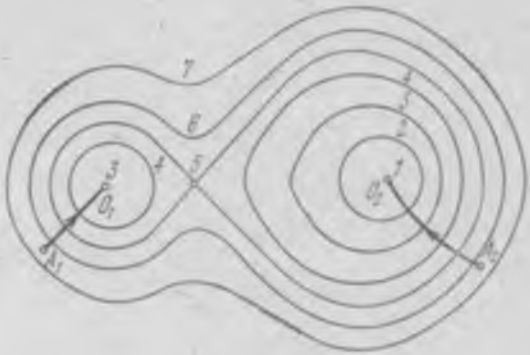


Рис. 24. Пример функции с двумя локальными минимумами в точках O_1 и O_2.

Представьте себе теперь, что, не имея перед глазами рис. 24 и не зная о многоэкстремальности функции, мы начали поиск наименьшего значения с помощью метода градиентного спуска из точки A_1. Поиск приведет нас в точку O_1, которую ошибочно можно принять за искомый ответ. С другой стороны, если мы начнем поиск с точки A_2, то окажемся на правильном пути и быстро придем в точку O_2.

Как бороться с многоэкстремальностью? Универсального ответа на этот вопрос нет. Самый простой прием состоит в том, что проводят поиск несколько раз, начиная его с разных точек. Если при этом получаются разные ответы, то сравнивают в них значения целевой функции и выбирают наименьшее. Расчеты останавливают после того, как несколько новых поисков не меняют полученного ранее результата. Выбор начальных точек поиска, обоснованность прекращения расчетов в значительной степени зависят от опыта и интуиции специалистов, решающих задачу.

Нарисованная картина может показаться слишком мрачной. На самом деле во многих случаях имеется различная дополнительная информация о характере задачи, которая

(18) три остальных. Соответствующие формулы имеют вид

$$\begin{aligned} x_2 &= 50 - x_1, \\ x_3 &= 40 - x_1, \\ x_4 &= 30 + x_1. \end{aligned} \tag{19}$$

Учитывая (16), получаем систему

$$\begin{aligned} x_1 &\geqslant 0, \\ 50 - x_1 &\geqslant 0, \\ 40 - x_1 &\geqslant 0, \\ 30 + x_1 &\geqslant 0, \end{aligned} \tag{20}$$

из которой

$$0 \leqslant x_1 \leqslant 40. \tag{21}$$

Таким образом, задавая любое x_1, удовлетворяющее (21), и вычисляя x_2, x_3, x_4 по формулам (19), мы получим один из возможных планов перевозки. При реализации этого плана с каждого склада будет вывезено и на каждый завод доставлено нужное количество муки.

Вычислим стоимость перевозок. Для этого подставим (19) в формулу (17). В результате получим

$$f = 142 - 0{,}2x_1. \tag{22}$$

Эта формула определяет величину f как функцию одной переменной x_1, которую можно выбирать произвольно в пределах условий (21). Стоимость окажется минимальной, если мы придадим величине x_1 наибольшее возможное значение: $x_1 = 40$. Значения остальных величин x_i находятся по формулам (19).

Итак, оптимальный по стоимости план перевозок имеет вид

$$x_1 = 40, \quad x_2 = 10, \quad x_3 = 0, \quad x_4 = 70. \tag{23}$$

Стоимость перевозок в этом случае составляет 134 р. При любом другом допустимом плане перевозок она окажется выше: $f > f_{\min} = 134$.

Задача об использовании ресурсов. Мебельная фабрика выпускает стулья двух типов. На изготовление одного стула первого типа, стоимостью 8 р., расходуется 2 м досок стандартного сечения, 0,5 м² обивочной ткани и 2 чел./ч рабочего времени. Для стульев второго типа аналогичные данные составляют: 12 р., 4 м, 0,25 м² и 2,5 чел./ч.

Допустим, что в распоряжении фабрики имеется 440 м досок, 65 м² обивочной ткани, 320 чел./ч рабочего времени. Какое количество стульев каждого типа надо изготовить, чтобы в рамках этих ресурсов стоимость произведенной продукции была максимальной?

Для ответа на этот вопрос постараемся опять сформулировать задачу как математическую. Обозначим через x_1 и x_2 запланированное к производству число стульев соответственно первого и второго типов. Ограниченный запас сырья и трудовых ресурсов означает, что x_1 и x_2 должны удовлетворять неравенствам

$$\begin{aligned} 2x_1 + 4x_2 &\leqslant 440, \\ \frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{4}x_2 &\leqslant 65, \\ 2x_1 + \frac{5}{2}x_2 &\leqslant 320. \end{aligned} \tag{24}$$

Кроме того, по смыслу задачи они должны быть неотрицательными:

$$x_1 \geqslant 0, \quad x_2 \geqslant 0. \tag{25}$$

Стоимость запланированной к производству продукции определяется формулой

$$f(x_1, x_2) = 8x_1 + 12x_2. \tag{26}$$

Итак, с математической точки зрения задача составления оптимального по стоимости выпущенной продукции плана фабрики сводится к определению пары целых чисел x_1, x_2, удовлетворяющих линейным неравенствам (24), (25) и дающих наибольшее значение линейной функции (26). Мы опять получили типичную задачу линейного программирования. По своей постановке она несколько отличается от транспортной задачи, однако это различие не существенно.

Для анализа сформулированной задачи рассмотрим плоскость и введем на ней декартову систему координат x_1, x_2. Найдем на этой плоскости множество точек, координаты которых удовлетворяют (24), (25). Неравенства (25) означают, что это множество лежит в первой четверти. Выясним теперь смысл ограничений, которые задаются неравенствами (24).

Проведем на плоскости прямую, определяемую уравнением

$$2x_1 + 4x_2 = 440 \tag{27}$$

существенно помогает при выборе метода, начальной точки поиска и т. д. Кроме того, пока мы не делали никаких предположений о специальных свойствах целевой функции и о характере рассматриваемой области. Это затрудняет анализ. Конкретизация задачи, выделение определенных классов функций и областей позволяет провести более глубокое исследование и разработать специальные методы, которые решают задачу исчерпывающим образом. Важным классом таких «специализированных» задач оптимизации являются *задачи линейного программирования*, о которых будет рассказано в следующем параграфе. Существуют и другие типы задач оптимизации, конкретные специфические особенности которых позволяют провести их детальный анализ и разработать эффективные методы решения. Однако на них мы останавливаться не будем.

§ 5. Линейное программирование

В этом параграфе мы познакомимся с линейным программированием. Так называют задачи оптимизации, в которых целевая функция является линейной функцией своих аргументов, а условия, определяющие их допустимые значения, имеют вид линейных уравнений и неравенств. Линейное программирование начало развиваться в первую очередь в связи с задачами экономики, с поиском способов оптимального распределения и использования ресурсов. Оно послужило основой широкого использования математических методов в экономике. Следует подчеркнуть, что в рамках реальных экономических задач число независимых переменных обычно бывает очень большим (тысячи, десятки тысяч аргументов). Поэтому практическая реализация алгоритмов решения таких задач принципиально невозможна без использования современной вычислительной техники.

Рассмотрим в качестве примера две типичные задачи линейного программирования: транспортную задачу и задачу об использовании ресурсов.

Транспортная задача. В городе имеются два склада муки и два хлебозавода. Ежедневно с первого склада вывозится 50 т муки, со второго — 70 т. Эта мука доставляется на хлебозаводы, причем первый завод получает 40 т, второй — 80 т. Допустим, что перевозка одной тонны муки с первого склада на первый завод стоит 1 р. 20 к., с первого склада на второй завод — 1 р. 60 к., со второго склада на первый завод — 80 к. и со второго склада на второй завод — 1 р.

Как нужно спланировать перевозки, чтобы их стоимость была минимальной?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, дадим математическую постановку задачи. Обозначим через x_1 и x_2 количество муки, которую следует перевезти с первого склада соответственно на первый и второй заводы, а через x_3 и x_4 — количество муки, которую нужно перевезти со второго склада на первый и второй заводы. Эти условия приводят к системе уравнений

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= 50, \\ x_3 + x_4 &= 70, \\ x_1 + x_3 &= 40, \\ x_2 + x_4 &= 80, \end{aligned} \tag{15}$$

$$x_i \geqslant 0, \qquad i = 1, 2, 3, 4. \tag{16}$$

Первые два уравнения системы определяют, сколько муки нужно вывести с каждого склада, два других уравнения показывают, сколько муки нужно привезти на каждый завод. Неравенства (16) означают, что в обратном направлении с заводов на склады муку не возят. Общая стоимость всех перевозок определяется формулой

$$f = 1{,}2x_1 + 1{,}6x_2 + 0{,}8x_3 + x_4. \tag{17}$$

С математической точки зрения задача заключается в том, чтобы найти числа x_i ($i = 1, 2, 3, 4$), удовлетворяющие условиям (15), (16) и минимизирующие стоимость перевозок (17).

Рассмотрим систему (15). Это система четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Однако независимыми в ней являются только первые три уравнения, 4-е — их следствие (если сложить 1-е и 2-е уравнения и вычесть 3-е, получится 4-е). Таким образом, фактически нужно рассмотреть следующую систему, эквивалентную (15):

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= 50, \\ x_3 + x_4 &= 70, \\ x_1 + x_3 &= 40. \end{aligned} \tag{18}$$

В ней число уравнений на единицу меньше числа неизвестных, так что мы можем выбрать какую-нибудь неизвестную, например x_1, и выразить через нее с помощью уравнений

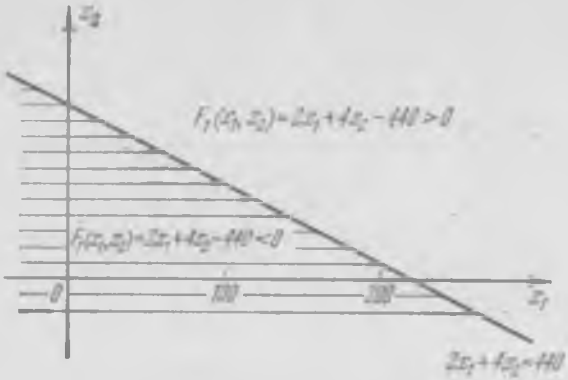


Рис. 25. Решение неравенства $2x_1 + 4x_2 < 440$.

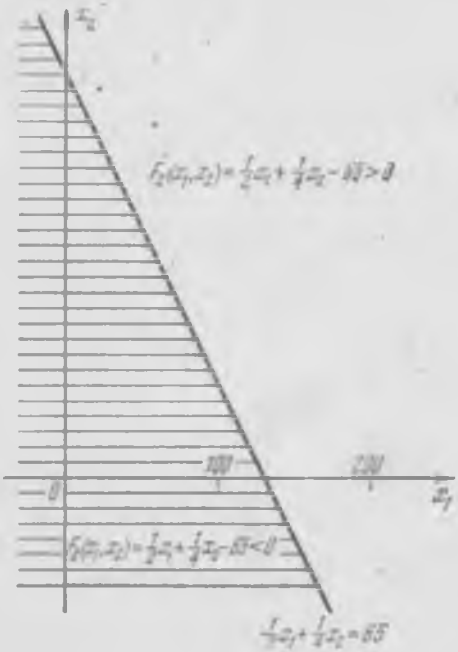


Рис. 26. Решение неравенства $\frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{4}x_2 < 65$.

(рис. 25). Она делит плоскость на две полуплоскости. На одной из них, расположенной ниже прямой (27), функция $F_1(x_1, x_2)=2x_1+4x_2-440$ принимает отрицательные значения, на другой, расположенной выше прямой (27),— положительные. Таким образом, первое из неравенств (24) выполняется на множестве точек, которое включает в себя прямую (27) и полуплоскость, расположенную ниже этой прямой. На рис. 25 соответствующая часть плоскости заштрихована.

Совершенно аналогично можно найти множества точек, удовлетворяющих второму и третьему неравенствам из системы (24). Они показаны на рис. 26, 27 штриховкой.

Возьмем пересечение трех найденных множеств и выделим его часть, расположенную в первой четверти. В результате получим множество точек, удовлетворяющих всей совокупности ограничений (24), (25). Данное множество имеет вид пятиугольника, показанного на рис. 28. Его вершинами являются точки пересечения прямых, на которых неравенства (24), (25) переходят в точные равенства. Координаты вершин пятиугольника указаны на рис. 28.

Любой точке P с целочисленными координатами (x_1, x_2), принадлежащей данному пятиугольнику, соответствует план выпуска стульев, который может быть выполнен при имеющихся запасах сырья и трудовых ресурсов (реализуемый план). Наоборот, если точка P не принадлежит пятиугольнику, то соответствующий план не может быть выполнен (нереализуемый план).

Рассмотрим на плоскости x_1, x_2 линии уровня целевой функции (26):

$$8x_1+12x_2=C. \tag{28}$$

Это уравнение описывает семейство прямых, параллельных прямой

$$8x_1+12x_2=0. \tag{29}$$

При параллельном переносе этой прямой вправо параметр C возрастает, влево — убывает.

Свойства функции (26) тесно связаны с прямыми (28). Вдоль каждой из них она сохраняет постоянное значение, равное C, а при переходе с одной прямой на другую ее значение меняется.

Будем рассматривать только первую четверть. Предположим, что мы перешли из точки P_1, расположенной на одной прямой, в точку P_2, расположенную на другой

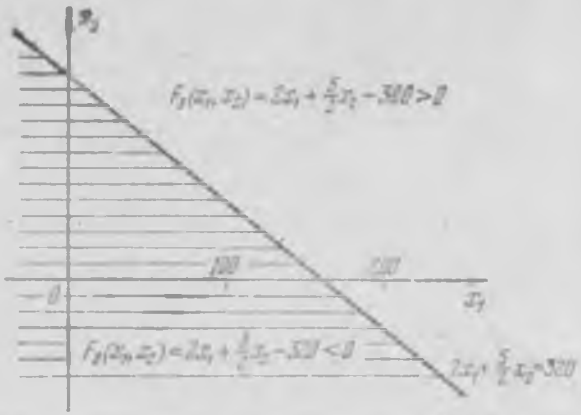


Рис. 27. Решение неравенства $2x_1 + \frac{5}{2}x_2 < 320$.

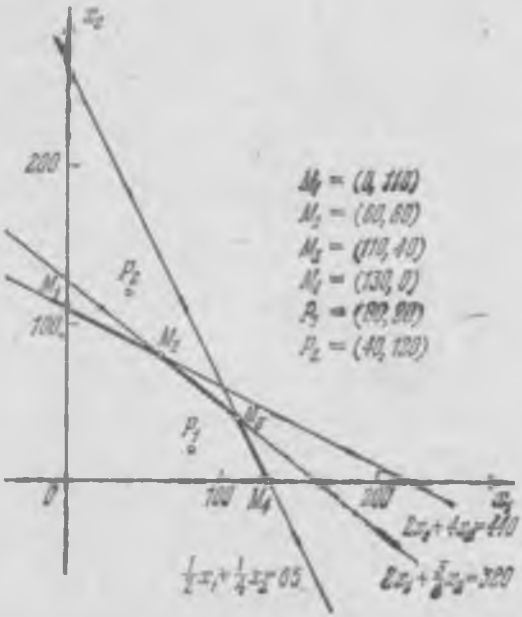


Рис. 28. Пятиугольник $OM_1M_2M_3M_4$, точки которого удовлетворяют системе неравенств (24), (25).

прямой (рис. 29). Если вторая прямая расположена дальше от начала координат, чем первая, то функция f при этом переходе возрастет. Отсюда следует важный вывод: оптимальный план должен располагаться на прямой семейства (28), наиболее удаленной от начала координат.

Этот вывод позволяет закончить решение задачи. Посмотрите на рис. 30. На нем воспроизведен пятиугольник реализуемых планов и нарисована прямая семейства (28), проходящая через точку M_2 с координатами (60, 80). Она является предельной прямой семейства, имеющей общую точку с пятиугольником. Если мы попытаемся с помощью параллельного переноса отодвинуть ее дальше от начала координат, то получим прямую, не имеющую общих точек с пятиугольником, т. е. соответствующие планы нереализуемы.

Итак, оптимальный план найден,— он предписывает производство 60 стульев первого типа и 80 стульев второго типа. Стоимость этой продукции 1440 р. На выполнение плана нужно затратить: 440 м досок, 50 м² обивочной ткани, 320 чел./ч рабочего времени.

Вы видите, что оптимальный план требует полного использования запаса досок и трудовых ресурсов, в то время как обивочная ткань будет израсходована не полностью — останется 15 м².

Этот результат ясен из рис. 30. Точка M_2, определяющая оптимальный план, является вершиной пятиугольника. Она лежит на пересечении прямых

$$2x_1 + 4x_2 = 440,$$

$$2x_1 + \frac{5}{2}x_2 = 320.$$

Уравнения этих прямых получаются из первого и третьего условий системы (24) при замене их на строгие равенства. Это означает полный расход досок и трудовых ресурсов. Однако точка M_2 не принадлежит прямой

$$\frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{4}x_2 = 65,$$

так что второе условие (24), связанное с ограниченным запасом обивочной ткани, имеет в ней форму неравенства

$$50 < 65.$$

Проведенный анализ показывает, что дальнейшее увеличение стоимости продукции регламентируется запасом досок и трудовыми ресурсами.



ис. 29. Линии уровня функции $f(x_1, x_2)=8x_1+12x_2$. Возрастани функции при переходе из точки P_1 в точку P_2.

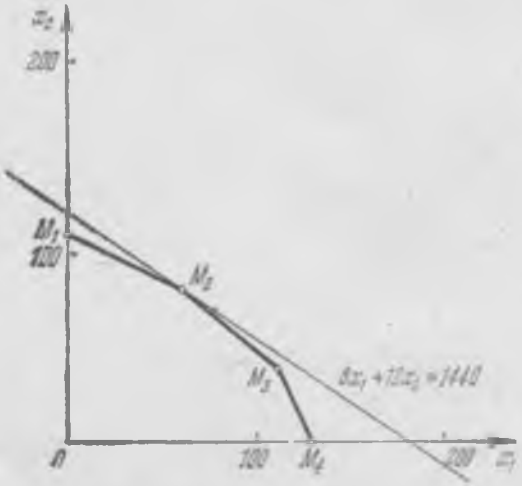


Рис. 30. Определение оптимального плана производства стульев.

Мы рассмотрели две задачи линейного программирования. По своей постановке они носят достаточно общий характер, несмотря на «учебный» вариант конкретных условий. Небольшое число переменных (4 маршрута, 2 вида продукции) позволило просто и наглядно получить их решение.

В настоящее время разработаны и реализованы в виде стандартных программ общие алгоритмы решения задач линейного программирования. Они позволяют получать ответ наиболее эффективным путем с минимальными затратами машинного времени. Применение ЭВМ к решению задач линейного программирования, начавшееся в 50-е годы, послужило основой широкого применения математических методов в экономике.

ГЛАВА 7

ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ. ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ

§ 1. Как подсчитать путь при неравномерном движении или работу переменной силы

Пусть материальная точка движется со скоростью $v(t)$. Требуется определить путь, который она пройдет за время $T_1 \leqslant t \leqslant T_2$. Если точка движется равномерно, т. е. $v(t)=v=$ $=\text{const}$, то ответ дается простой формулой:

$$S = v(T_2 - T_1).$$

Подсчитаем пройденный путь в случае неравномерного движения. Для этого фиксируем между начальным и конечным моментами времени ряд промежуточных моментов: $T_1 < t_1 < t_2 < \ldots < t_{n-1} < T_2$. Положим также, для единообразия обозначений, $t_0 = T_1$ и $t_n = T_2$. В результате исходный временной отрезок $[T_1, T_2]$ окажется разбитым на более мелкие отрезки $[t_{k-1}, t_k]$ $(k=1, 2, \ldots, n)$.

Рассмотрим один из этих отрезков. Выберем на нем какой-нибудь момент времени $\tau_k \in [t_{k-1}, t_k]$ и найдем соответствующее ему значение скорости $v_k = v(\tau_k)$. Если данный временной отрезок является достаточно коротким, то скорость $v(t)$ изменяется в течение него мало. Пренебрегая этими изменениями, будем приближенно считать движение на этом отрезке равномерным со скоростью $v_k = v(\tau_k)$ $(t_{k-1} \leqslant t \leqslant t_k)$. В результате за данный отрезок времени будет пройден путь

$$\Delta s_k \approx v(\tau_k)\,\Delta t_k, \qquad \Delta t_k = t_k - t_{k-1}.$$

Чтобы подсчитать весь путь, нужно проделать данную процедуру для каждого временного отрезка и результаты сложить:

$$s \approx v(\tau_1)\,\Delta t_1 + v(\tau_2)\,\Delta t_2 + \ldots + v(\tau_n)\,\Delta t_n. \qquad (1)$$

Полученное приближенное выражение зависит от того, как мы разбили временной отрезок $[T_1, T_2]$ на части и как для каждой из них выбрали момент времени τ_k, по которому определяется скорость равномерного движения $v_k = v(\tau_k)$, заменяющего заданное неравномерное движение при $t \in [t_{k-1}, t_k]$. Разным разбиениям и разному выбору моментов τ_k соответствуют разные значения суммы (1).



Рис. 31. Криволинейная трапеция, ограниченная графиком функции $f(x)$, осью x и двумя вертикальными прямыми $x = a$ и $x = b$.

Будем делать разбиение временного отрезка $[T_1, T_2]$ все более мелким. При этом отклонение движения от равномерного для каждого частичного временного отрезка $[t_{k-1}, t_k]$ должно уменьшаться. Поэтому естественно ожидать, что в пределе при неограниченном измельчении разбиения отрезка $[T_1, T_2]$ приближенное равенство (1) перейдет в точное. Мы получим формулу пройденного пути. Предел выражения, стоящего в правой части равенства (если он существует), называется *определенным интегралом* от функции $v(t)$ по отрезку $[T_1, T_2]$ и обозначается

$$s = \int_{T_1}^{T_2} v(t)\,dt. \qquad (2)$$

Рассмотрим еще одну задачу. Пусть материальная точка движется вдоль оси x под действием некоторой силы, величина которой зависит от положения точки: $F = F(x)$. Требуется подсчитать работу, совершенную при перемещении точки из положения $x = a$ в положение $x = b$. Эта задача с математической точки зрения совершенно аналогична предыдущей, и для ее решения можно использовать тот же подход.

Выберем на отрезке $[a, b]$ ряд промежуточных точек $a < x_1 < x_2 < \ldots < x_{n-1} < b$ и положим $x_0 = a$, $x_n = b$. В резуль-

тате исходный отрезок $[a, b]$ окажется разбитым на n отрезков $[x_{k-1}, x_k]$ $(k=1, 2, \ldots, n)$. Возьмем на каждом из них по произвольной точке $\xi_k \in [x_{k-1}, x_k]$ и подсчитаем величину силы в этой точке: $F_k = F(\xi_k)$. Если отрезок $[x_{k-1}, x_k]$

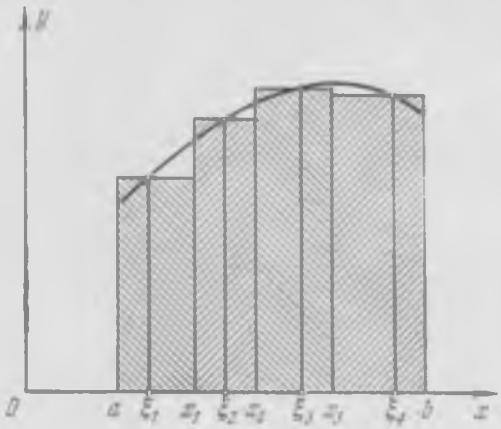


Рис. 32. Построение ступенчатого многоугольника, аппроксимирующего криволинейную трапецию.

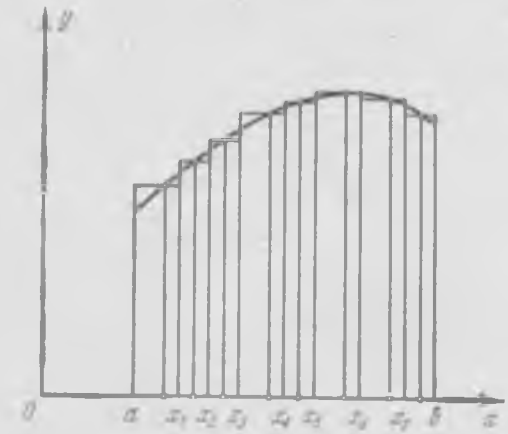


Рис. 33. Улучшение аппроксимации криволинейной трапеции ступенчатым многоугольником при измельчении разбиения.

достаточно мал, то сила изменяется на нем мало и мы приближенно можем считать ее постоянной: $F(x) \approx F(\xi_k)$, $x \in [x_{k-1}, x_k]$. При этом для работы по перемещению матери

альной точки из положения x_{k-1} в положение x_k получим

$$\Delta A_k \approx F(\xi_k)\,\Delta x_k, \qquad \Delta x_k = x_k - x_{k-1}.$$

Складывая эти величины, подсчитаем полную работу:

$$A \approx F(\xi_1)\,\Delta x_1 + F(\xi_2)\,\Delta x_2 + \ldots + F(\xi_n)\,\Delta x_n. \tag{3}$$

Эта формула аналогична формуле (1). Чем мельче разбиение, тем она точнее. В пределе при неограниченном измельчении разбиения она дает точное выражение для работы в виде интеграла от функции $F(x)$:

$$A = \int_a^b F(x)\,dx. \tag{4}$$

Совершенно аналогично можно подсчитать заряд Q, который переносится через поперечное сечение проводника током $I(t)$ за время $T_1 \leqslant t \leqslant T_2$:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} I(t)\,dt. \tag{5}$$

Рассмотрим последний пример. На рис. 31 показана фигура, ограниченная графиком некоторой функции $y = f(x)$, осью x и двумя вертикальными прямыми $x=a$ и $x=b$. Такую фигуру принято называть *криволинейной трапецией*. Требуется подсчитать ее площадь.

Для решения этой задачи, как и предыдущих, разобьем отрезок $[a, b]$ точками x_k ($k=0, 1, \ldots, n$, $x_0=a$, $x_n=b$) на частичные отрезки $[x_{k-1}, x_k]$. На каждом из них выберем произвольную точку $\xi_k \in [x_{k-1}, x_k]$ ($k=1, 2, \ldots, n$), вычислим в ней значение функции $f(x)$ и построим прямоугольник высотой $f(\xi_k)$ (рис. 32). В результате мы получим ступенчатый многоугольник, который можно рассматривать как некоторое приближение к более сложной фигуре — заданной криволинейной трапеции.

Легко подсчитать площадь этого многоугольника $\tilde{S}$ как сумму площадей отдельных прямоугольников:

$$\tilde{S} = f(\xi_1)\,\Delta x_1 + f(\xi_2)\,\Delta x_2 + \ldots + f(\xi_n)\,\Delta x_n. \tag{6}$$

При измельчении разбиения точность аппроксимации криволинейной трапеции ступенчатым многоугольником повышается (ср. рис. 32 и 33). Поэтому за площадь криволинейной трапеции естественно принять предел площадей ступенчатых многоугольников при неограниченном измель-

чении разбиения, т. е. соответствующий определенный интеграл:

$$S = \int_a^b f(x)\,dx. \tag{7}$$

Можно было бы предложить множество других задач, решение которых также записывается через определенный интеграл, но в этом нет необходимости: характер таких задач достаточно ясен из разобранных примеров.

§ 2. Понятие определенного интеграла

После того как мы рассмотрели на интуитивном уровне несколько задач, приводящих к идее определенного интеграла, обсудим это важнейшее понятие метематического анализа на уровне строгих математических определений.

Пусть на отрезке $[a, b]$ задана некоторая функция $f(x)$. Разобьем этот отрезок точками x_k: $a=x_0<x_1<\ldots<x_{n-1}<x_n=b$ на частичные отрезки $[x_{k-1}, x_k]$ $(k=1, 2, \ldots, n)$. Такую операцию условимся называть *разбиением* и обозначать символом $T(x_k)$. Вычислим длины полученных отрезков $\Delta x_k=x_k-x_{k-1}$ и положим $\Delta=\max\{\Delta x_k\}$. Величина Δ является длиной наибольшего отрезка при разбиении $T(x_k)$.

Выберем на каждом отрезке $[x_{k-1}, x_k]$ какую-нибудь точку $\xi_k \in [x_{k-1}, x_k]$ и вычислим в ней значение функции $f(x)$. Из найденных величин образуем сумму, которую называют *интегральной суммой*:

$$I(x_k, \xi_k) = f(\xi_1)\Delta x_1 + f(\xi_2)\Delta x_2 + \ldots + f(\xi_n)\Delta x_n. \tag{8}$$

Значение интегральной суммы определяется выбором точек разбиения x_k и точек ξ_k. Выражения (1), (3), (6) представляют собой интегральные суммы для соответствующих функций.

Нас будет интересовать поведение интегральных сумм при неограниченном измельчании разбиения, т. е. при $\Delta \to 0$. Сформулируем два определения.

Число $\mathcal{J}$ называется *пределом интегральных сумм* $I(x_k, \xi_k)$ при $\Delta \to 0$, если для всякой точности $\varepsilon>0$ можно указать такое δ, что для любого разбиения $T(x_k)$, удовлетворяющего условию $\Delta<\delta$, при произвольном выборе точек $\xi_k \in [x_{k-1}, x_k]$ выполняется неравенство

$$|\mathcal{J} - I(x_k, \xi_k)| < \varepsilon. \tag{9}$$

Если для функции $f(x)$, заданной на отрезке $[a, b]$, существует предел $\mathcal{J}$ интегральных сумм при $\Delta \to 0$, то она называется *интегрируемой* на отрезке $[a, b]$, а число $\mathcal{J}$ называется *определенным интегралом* от этой функции по отрезку $[a, b]$ и обозначается символом

$$\mathcal{J} = \int_a^b f(x)\,dx.$$

Рассмотрим в качестве примера функцию, равную постоянной на отрезке $[a, b]$: $f(x)=C$. Проведем какое-нибудь разбиение отрезка $T(x_k)$, выберем точки ξ_k и составим интегральную сумму

$$I(x_k, \xi_k) = C(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \ldots + \Delta x_n) = C(b-a).$$

Мы видим, что она не зависит ни от разбиения, ни от выбора точек ξ_k. Следовательно, существует предел интегральных сумм при $\Delta \to 0$, равный той же величине:

$$\lim_{\Delta \to 0} I(x_k, \xi_k) = \int_a^b C\,dx = C(b-a).$$

Мы доказали, что функция, равная постоянной, интегрируема, и вычислили соответствующий интеграл.

Вопрос об условиях интегрируемости в своей общей постановке подробно рассматривается в курсе математического анализа, и мы на нем останавливаться не будем. Отметим лишь, что свойством интегрируемости обладает достаточно широкий класс функций, к которому, в частности, относятся функции, непрерывные на отрезке $[a, b]$; функции, имеющие на отрезке $[a, b]$ конечное число точек разрыва и ограниченные; функции, монотонные на отрезке $a, b]$.

§ 3. Формула Ньютона — Лейбница

Чтобы воспользоваться формулами (2), (4), (5), (7) для подсчета соответствующих величин, нужно уметь вычислять определенные интегралы. Один из способов их вычисления основан на *формуле Ньютона — Лейбница*:

$$\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a), \qquad (10)$$

где $F(x)$ — какая-нибудь первообразная подынтегральной функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$. Напомним, что функция $F(x)$ называется *первообразной* функции $f(x)$, если она дифференцируема и ее производная $F'(x)$ равна $f(x)$.

Формула Ньютона — Лейбница играет важную роль в математическом анализе, устанавливая связь задачи определенного интегрирования с задачей отыскания первообразной (неопределенного интегрирования). Она позволяет вычислять интегралы от элементарных функций, первообразные которых тоже являются элементарными функциями. Если задача о первообразной подынтегральной функции решена в явном виде, то вычисление определенного интеграла сводится к подсчету разности ее значений в граничных точках отрезка $[a, b]$. Однако существует много функций, первообразные которых не выражаются через элементарные функции. Для них описанный способ вычисления определенных интегралов неприменим.

Рассмотрим в качестве примера два интеграла:

$$\int_1^2 \frac{1}{x}\,dx \quad \text{и} \quad \int_1^2 \frac{e^{-x}}{x}\,dx.$$

В первом из них подынтегральная функция $f(x)=1/x$, ее первообразная $F(x)=\ln x$. Используя формулу Ньютона — Лейбница, получаем

$$\int_1^2 \frac{1}{x}\,dx = \ln 2 - \ln 1 = \ln 2. \tag{11}$$

Для вычисления второго интеграла данный метод неприменим, потому что первообразная функции $f(x)=e^{-x}/x$ не является элементарной функцией.

Отметим также, что формула Ньютона — Лейбница не позволяет вычислять интегралы от функций, которые задаются графиком или таблицей.

Все это позволяет сделать вывод, что формула Ньютона — Лейбница не дает общего, универсального метода нахождения определенного интеграла от произвольной функции $f(x)$ по ее значениям на отрезке $[a, b]$, она не является алгоритмом решения рассматриваемой задачи. Поэтому мы не будем останавливаться ни на обосновании формулы Ньютона — Лейбница, ни на обсуждении методов отыскания первообразных. Все эти вопросы подробно изучаются в курсе математического анализа. Наша цель — познакомить

с некоторыми универсальными вычислительными алгоритмами решения задачи определенного интегрирования. Такие алгоритмы позволяют подсчитывать интегралы непосредственно по значениям подынтегральной функции $f(x)$ и не зависят от способа ее задания. Соответствующие формулы обычно называют *формулами численного интегрирования* или *квадратурными формулами* (буквально — формулами вычисления площадей).

§ 4. Алгоритмы численного интегрирования

Наиболее просто к идее численного интегрирования можно подойти, принимая во внимание определение интеграла как предела сумм. Если взять какое-нибудь достаточно мелкое разбиение отрезка $[a, b]$ и построить для него интегральную сумму (8), то ее значение можно приближенно принять за значение соответствующего интеграла.

Пусть, например, отрезок $[a, b]$ разбит на n равных частей длины $h=(b-a)/n$ и в качестве точек ξ_k выбраны средние точки соответствующих отрезков: $\xi_k=a+h\,(k-1/2)$ $(k=1, 2, \ldots, n)$. В этом случае выражение для интегральной суммы примет вид

$$I_n=(f(\xi_1)+f(\xi_2)+\ldots+f(\xi_n))\frac{b-a}{n}.$$

Если функция $f(x)$ интегрируема на отрезке $[a, b]$, то

$$\lim_{n\to\infty} I_n=\mathcal{I}=\int_a^b f(x)\,dx. \qquad (12)$$

Согласно (12) выражение для интеграла $\mathcal{I}$ можно записать в виде $\mathcal{I}=I_n+\alpha_n$, причем $\lim\limits_{n\to\infty}\alpha_n=0$. Пренебрегая величиной α_n, получим приближенную формулу для вычисления интеграла $\mathcal{I}$, которую обычно называют *формулой прямоугольников*:

$$\mathcal{I}\approx I_n=(f(\xi_1)+f(\xi_2)+\ldots+f(\xi_n))\frac{b-a}{n}. \qquad (13)$$

Причина такого названия связана с геометрической интерпретацией этой формулы. Интеграл $\mathcal{I}$ — это площадь криволинейной трапеции, а интегральная сумма, которой мы приближенно аппроксимируем интеграл,— площадь фигуры, составленной из прямоугольников (рис. 34). Все прямоугольники имеют одинаковое основание $h=(b-a)/n$,

а их высоты определяются значениями функции $f(x)$ в средних точках ξ_k отрезков разбиения. Разность между площадями этих двух фигур равна α_n, с возрастанием n она стремится к нулю.



Рис. 34. Геометрическая интерпретация формулы прямоугольников.

Предположим, что функция $f(x)$ имеет на отрезке $[a, b]$ непрерывную вторую производную. В этом случае справедливо следующее утверждение: на отрезке $[a, b]$ существует такая точка x_n^*, что погрешность формулы (13) можно записать в виде

$$\alpha_n = \frac{(b-a)^3}{24n^2} f''(x_n^*). \tag{14}$$

Важная особенность данной формулы состоит в том, что нам гарантировано существование соответствующей точки x_n^*, но ничего не известно о ее положении. Поэтому формула (14) не позволяет вычислить α_n, но дает возможность ее оценить:

$$|\alpha_n| \leqslant \frac{(b-a)^3}{24n^2} \max |f''(x)|. \tag{15}$$

Это неравенство показывает, что с возрастанием n погрешность в формуле (13) убывает не медленнее, чем $1/n^2$.

Вывод формулы прямоугольников основан на замене интеграла интегральной суммой (13). Наряду с этим для построения формул численного интегрирования можно использовать другой подход: построить вспомогательную функцию, близкую к подынтегральной функции $f(x)$, и приближенно заменить интеграл от функции $f(x)$ интегралом от вспомогательной функции.

Рассмотрим простейшую реализацию этой идеи. Пусть отрезок $[a, b]$ разбит на n равных частей длины $h=(b-a)/n$ точками $x_k=a+kh$ ($k=0, 1, \ldots, n$, $x_0=a$, $x_n=b$). Построим функцию $g_n(x)$, определенную следующим образом. На каждом из отрезков $[x_{k-1}, x_k]$ она является линейной, а в граничных точках x_{k-1}, x_k принимает те же значения, что и функция $f(x)$: $f(x_{k-1})$ и $f(x_k)$. Аналитически эта функция задается с помощью формул

$$g_n(x)=f(x_{k-1})+\frac{f(x_k)-f(x_{k-1})}{h}(x-x_{k-1}), \qquad (16)$$

$$x\in[x_{k-1}, x_k], \qquad k=1, 2, \ldots, n.$$

Ее график представляет собой ломаную линию, начальная, конечная и угловые точки которой принадлежат также графику функции $f(x)$ (рис. 35). С увеличением n число общих точек растет и ломаная $y=g_n(x)$ приближается к линии $y=f(x)$.

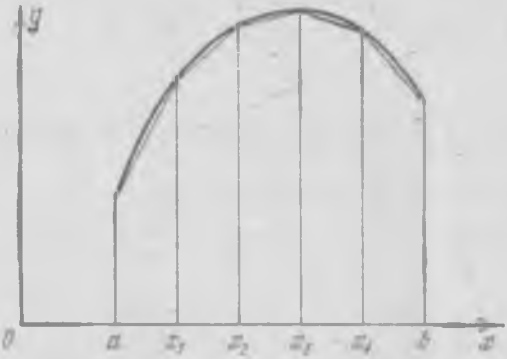


Рис. 35. Геометрическая интерпретация формулы трапеций.

Вычислим с помощью формулы Ньютона — Лейбница интеграл от функции $g_n(x)$ по отрезку $[x_{k-1}, x_k]$:

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} g_n(x)\,dx=$$

$$=f(x_{k-1})\int_{x_{k-1}}^{x_k} dx+\frac{f(x_k)-f(x_{k-1})}{h}\int_{x_{k-1}}^{x_k}(x-x_{k-1})\,dx=$$

$$=f(x_{k-1})\,h+\frac{1}{2}(f(x_k)-f(x_{k-1}))\,h=\frac{1}{2}(f(x_{k-1})+f(x_k))\,h. \qquad (17)$$

Полученный ответ имеет простой геометрический смысл. Интеграл равен площади фигуры, ограниченной графиком функции $g_n(x)$ (16), осью x и вертикальными линиями $x=x_{k-1}$, $x=x_k$. В данном случае эта фигура является трапецией (см. рис. 35), и ее площадь равна произведению полусуммы оснований на высоту. Однако мы получили этот результат прямым интегрированием, а не ссылкой на формулы геометрии.

Подсчитаем теперь интеграл от функции $g_n(x)$ по всему отрезку $[a, b]$:

$$T_n = \int_a^b g_n(x)\,dx = \int_a^{x_1} g_n(x)\,dx + \int_{x_1}^{x_2} g_n(x)\,dx + \ldots + \int_{x_{n-1}}^{b} g_n(x)\,dx.$$

Подставляя вместо интегралов по отдельным отрезкам $[x_{k-1}, x_k]$ их значения (17), получим

$$T_n = \left(\frac{1}{2}f(a) + f(x_1) + f(x_2) + \ldots + f(x_{n-1}) + \frac{1}{2}f(b)\right)\frac{b-a}{n}.$$

Полученное выражение можно представить в виде

$$T_n = \left(f(x_1) + f(x_2) + \ldots + f(x_{n-1}) + f(b)\right)\frac{b-a}{n} + (f(a) - f(b))\frac{b-a}{2n}.$$

Первое слагаемое в этой формуле представляет собой интегральную сумму для функции $f(x)$ в случае, когда в качестве точек ξ_k на отрезках $[x_{k-1}, x_k]$ выбираются правые концы этих отрезков: $\xi_k = x_k$ $(k=1, 2, \ldots, n)$. При $n \to \infty$ интегральная сумма стремится к интегралу $\mathcal{I} = \int_a^b f(x)\,dx$.

Второе слагаемое при $n \to \infty$ стремится к нулю. Таким образом,

$$\lim_{n\to\infty} T_n = \lim_{n\to\infty} \int_a^b g_n(x)\,dx = \mathcal{I} = \int_a^b f(x)\,dx. \qquad (18)$$

Согласно этому выражение для интеграла $\mathcal{I}$ можно записать в виде $\mathcal{I} = T_n + \beta_n$, причем $\lim_{n\to\infty} \beta_n = 0$. Прене-

брегая величиной β_n, получим приближенную формулу для вычисления интеграла $\mathcal{I}$, которую обычно называют *формулой трапеций*:

$$\mathcal{I} \approx T_n = \left(\frac{1}{2} f(a) + f(x_1) + \ldots + f(x_{n-1}) + \frac{1}{2} f(b)\right) \frac{b-a}{n}. \quad (19)$$

Причина такого названия, как и в предыдущем случае, связана с геометрической интерпретацией формулы. Она приближенно представляет площадь криволинейной трапеции, соответствующей интегралу $\mathcal{I}$, в виде суммы площадей обычных трапеций, которые образуются графиком функции $g_n(x)$ (см. рис. 35). Разность между площадями этих двух фигур равна β_n, с возрастанием n она стремится к нулю.

Предположим, как и при анализе формулы прямоугольников (13), что функция $f(x)$ имеет на отрезке $[a, b]$ непрерывную вторую производную. В этом случае справедливо следующее утверждение: на отрезке $[a, b]$ существует такая точка x_n^{**}, что погрешность формулы (19) можно записать в виде

$$\beta_n = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(x_n^{**}). \quad (20)$$

Эта формула совершенно аналогична (14). Она не позволяет вычислить величину β_n, поскольку неизвестно положение точки x_n^{**}, но дает возможность ее оценить:

$$|\beta_n| \leqslant \frac{(b-a)^3}{12n^2} \max |f''(x)|. \quad (21)$$

Данная оценка отличается от оценки погрешности формулы прямоугольников (15) только числовым множителем. Таким образом, формулы прямоугольников и трапеций характеризуются примерно одинаковой точностью.

Идею, которая была использована при построении формулы трапеций, можно развивать дальше и использовать для получения более точных формул численного интегрирования. Например, если воспользоваться для аппроксимации подынтегральной функции на отдельных отрезках $[x_{k-1}, x_k]$ не линейной функцией $g_n(x)$, а полиномом второй степени, то мы придем к *формуле Симпсона*:

$$\mathcal{I} = \int_a^b f(x)\,dx \approx S_n =$$

$$= (f(a) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \ldots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(b)) \frac{b-a}{3n}. \quad (22)$$

В этой формуле, как и в формуле трапеций, предполагается, что отрезок $[a, b]$ разбит на n равных частей длины $h=(b-a)/n$ точками $x_k=a+kh$ $(k=0, 1, \ldots, n)$, причем число n должно быть обязательно четным. Значение функции $f(x)$ в нечетных точках разбиения $x_1, x_3, \ldots, x_{n-1}$ входит с коэффициентом 4, в четных $x_2, x_4, \ldots, x_{n-2}$ — с коэффициентом 2 и в двух граничных $x_0=a$, $x_n=b$ — с коэффициентом 1.

Вывод формулы Симпсона не содержит новых идей по сравнению с выводом формулы трапеций, но является более громоздким. Мы на нем останавливаться не будем.

Обозначим через γ_n погрешность формулы Симпсона. Предположим, что функция $f(x)$ имеет на отрезке $[a, b]$ непрерывную четвертую производную; тогда на данном отрезке найдется такая точка $\bar{x}_n$, что величину γ_n можно записать в виде

$$\gamma_n = -\frac{(b-a)^5}{180n^4} f^{(4)}(\bar{x}_n). \tag{23}$$

Отсюда получаем оценку

$$|\gamma_n| \leqslant \frac{(b-a)^5}{180n^4} \max |f^{(4)}(x)|. \tag{24}$$

Отметим, что с возрастанием n погрешность убывает как $1/n^4$, т. е. быстрее, чем в формулах прямоугольников и трапеций.

В заключение для иллюстрации изложенного материала снова обратимся к интегралам, рассмотренным в § 3. Первый из них: $\int_1^2 \frac{1}{x}\,dx$, был вычислен по формуле Ньютона — Лейбница (10). Подсчитаем его теперь по формулам прямоугольников (13), трапеций (19) и Симпсона (22), выбирая $n=10$.

В табл. 1 приведены значения подынтегральной функции $f(x)=1/x$ в точках $\xi_k=1+h$ $(k-1/2)$, $h=(b-a)/n=0{,}1$ $(k=1, 2, \ldots, 10)$, используемые в формуле прямоугольников. Складывая значения функции, приведенные в третьем столбце таблицы, и умножая сумму на $h=0{,}1$, получим приближенное значение интеграла по формуле прямоугольников:

$$J \approx I_{10} = 0{,}692\,835\,360.$$

В табл. 2 приведены значения подынтегральной функции $f(x)=1/x$ в точках $x_k=1+kh$ $(k=0, 1, \ldots, n)$, используемые в формулах трапеций и Симпсона. Сложим значения функ-

Таблица 1

k	ξ_k	$f(\xi_k)$
1	1,05	0,952380952
2	1,15	0,869565217
3	1,25	0,800000000
4	1,35	0,740740740
5	1,45	0,689655172
6	1,55	0,645161290
7	1,65	0,606060606
8	1,75	0,571428571
9	1,85	0,540540540
10	1,95	0,512820512

Таблица 2

k	x_k	$f(x_k)$
0	1,0	1,000000000
1	1,1	0,909090909
2	1,2	0,833333333
3	1,3	0,769230769
4	1,4	0,714285714
5	1,5	0,666666666
6	1,6	0,625000000
7	1,7	0,588235294
8	1,8	0,555555555
9	1,9	0,526315789
10	2,0	0,500000000

ции в третьем столбце, умножив предварительно нулевую и десятую строчки на 1/2, и умножим полученную сумму на $h=0{,}1$. В результате получим значение интеграла по формуле трапеций:

$$\mathcal{I} \approx T_{10} = 0{,}693\,771\,403.$$

Наконец, получим значение интеграла по формуле Симпсона:

$$\mathcal{I} \approx S_{10} = 0{,}693\,150\,230.$$

В данном случае мы знаем точное значение интеграла:

$$\mathcal{I} = \ln 2 = 0{,}693\,147\,180.$$

Подсчитаем погрешности, которые дают все три формулы:

$$\alpha_{10} = \mathcal{I} - I_{10} = 0{,}000\,311\,820,$$
$$\beta_{10} = \mathcal{I} - T_{10} = -0{,}000\,624\,223,$$
$$\gamma_{10} = \mathcal{I} - S_{10} = -0{,}000\,003\,050.$$

Как и следовало ожидать, погрешность формулы Симпсона является наименьшей.

Вычислим производные подынтегральной функции $f(x)=1/x$:

$$f'(x) = -1/x^2, \quad f''(x) = 2/x^3, \quad f'''(x) = -6/x^4, \quad f^{(4)}(x) = 24/x^5.$$

На отрезке $[1, 2]$ $f''(x)>0$, $f^{(4)}(x)>0$, причем их наибольшие значения равны соответственно 2 и 24. Найденные погрешности имеют правильные знаки согласно формулам (14),

(20), (23), а их величины удовлетворяют неравенствам (15), (21), (24):

$$|\alpha_{10}| \leqslant \frac{2}{24 \cdot 100} = 0{,}000\,833\,333,$$

$$|\beta_{10}| \leqslant \frac{12}{12 \cdot 100} = 0{,}001\,666\,666,$$

$$|\gamma_{10}| \leqslant \frac{24}{180 \cdot 10\,000} = 0{,}000\,013\,333.$$

Рассмотрим теперь второй интеграл: $\mathcal{J} = \int_1^2 \frac{e^{-x}}{x}\,dx$. Его нельзя вычислить по формуле Ньютона — Лейбница, но легко подсчитать с помощью формул численного интегрирования.

Таблица 3

k	x_k	$f(x_k)$	$c_k f(x_k)$
0	1,0	0,367879441	0,367879441
1	1,1	0,302610076	1,210440304
2	1,2	0,250995176	0,501990352
3	1,3	0,209639841	0,838559364
4	1,4	0,176140688	0,352281376
5	1,5	0,148753440	0,595013760
6	1,6	0,126185324	0,252370648
7	1,7	0,107460896	0,429843584
8	1,8	0,091832716	0,183665432
9	1,9	0,078720326	0,314881304
10	2,0	0,067667642	0,067667642

Воспользуемся для расчета наиболее точной из трех формул — формулой Симпсона, выбирая, как и в предыдущем случае, $n=10$. В табл. 3 в третьем столбце приведены значения подынтегральной функции $f(x)=e^{-x}/x$ в точках $x_k=1+kh$, $h=0{,}1$ ($k=0, 1, \ldots, 10$), а в четвертом они умножены на коэффициент 1, 2 или 4 в зависимости от номера k в соответствии с формулой Симпсона. Складывая значения функции, приведенные в четвертом столбце таблицы, и умножая сумму на $h/3=1/30$, получим

$$\mathcal{J} \approx S_{10} = 0{,}170\,186\,440.$$

Вычислим четвертую производную функции $f(x)=e^{-x}/x$:

$$f^{(4)}(x)=e^{-x}\left(\frac{1}{x}+\frac{4}{x^2}+\frac{12}{x^3}+\frac{24}{x^4}+\frac{24}{x^5}\right).$$

На отрезке $[1, 2]$ $f^{(4)}(x)>0$, $\max|f^{(4)}(x)|=65e^{-1}<24$. Таким образом, S_{10} дает значение интеграла $\mathcal{J}$ с избытком ($\gamma_{10}<0$), а для величины ошибки справедлива оценка

$$|\gamma_{10}|<\frac{24}{180\cdot 10\,000}=0{,}000\,013\,333.$$

Попробуйте сами вычислить значения рассматриваемого интеграла по формуле трапеций, используя данные третьего столбца табл. 3. (Не забудьте умножить строки $k=0$ и $k=10$ на $1/2$.) Сравните полученные результаты. Найдите вторую производную функции $f(x)=e^{-x}/x$, определите по ней знак и оцените величину погрешности формулы трапеций.

В заключение отметим следующее. Оценка погрешности формул численного интегрирования с помощью неравенств типа (15), (21), (24) часто оказывается малоэффективной из-за трудностей, связанных с оценкой производных подынтегральной функции $f(x)$. Поэтому на практике для вычисления погрешности обычно пользуются следующим приемом. Выбирают число n, кратное 4, находят значения интеграла $\mathcal{J}$ по формуле Симпсона с числом точек n и $n/2$: S_n и $S_{n/2}$ ($n/2$ — целое четное число) и приближенно определяют погрешность численного интегрирования с помощью соотношения

$$\gamma_n=\mathcal{J}-S_n\approx\frac{1}{15}(S_n-S_{n/2}).$$

§ 5. Построение первообразной с помощью численного интегрирования

Формула Ньютона — Лейбница позволяет выразить значение определенного интеграла от функции $f(x)$ через ее первообразную $F(x)$. В математическом анализе устанавливается и прямо противоположная возможность: первообразная функции $f(x)$, непрерывной на отрезке $[a, b]$, может быть записана в виде определенного интеграла с переменным верхним пределом:

$$F(x)=\int_{x_0}^{x}f(t)\,dt. \qquad (25)$$

Здесь x_0, x — две точки отрезка $[a, b]$, причем нижний предел интегрирования x_0 предполагается фиксированным, а верхний x — переменным. В случае непрерывной функции $f(x)$ функция $F(x)$, определенная с помощью (25), является дифференцируемой и ее производная равна $f(x)$:

$$F'(x) = \frac{d}{dx}\left(\int_{x_0}^{x} f(t)\,dt\right) = f(x). \tag{26}$$

Формула (25) в сочетании с какой-нибудь формулой численного интегрирования, например Симпсона, представляет собой универсальный алгоритм построения первообразной. Приведем два примера, иллюстрирующих этот алгоритм.

Функция $f(x)=\sin x/x$ непрерывна и, следовательно, имеет первообразные. Они не могут быть выражены через элементарные функции, но представление в виде интеграла с переменным верхним пределом для них справедливо. Одну из первообразных мы получим, выбирая нижний предел интегрирования $x_0=0$. Ее называют *интегральным синусом* и обозначают

$$\operatorname{Si} x = \int_0^x \frac{\sin t}{t}\,dt.$$

Интегральный синус определен на всей числовой прямой, является нечетной функцией x, имеет конечные предельные значения на бесконечности:

$$\lim_{x\to\pm\infty} \operatorname{Si} x = \pm\pi/2.$$

Согласно (26)

$$(\operatorname{Si} x)' = \sin x/x.$$

По знаку производной легко определить области возрастания и убывания функции, разделенные точками экстремума $x_k=k\pi$ ($k=\pm1, \pm2, \ldots$). Методы численного интегрирования позволяют вычислить значение $\operatorname{Si} x$ при любом x. График интегрального синуса при $x\geqslant 0$ приведен на рис. 36.

В качестве второго примера рассмотрим *функцию ошибок* $\operatorname{erf} x$, играющую важную роль в теории вероятностей *). Подобно интегральному синусу, она вводится в виде инте-

*) Обозначение образовано с помощью первых букв английского названия функции error.

грала с переменным верхним пределом от функции e^{-x^2}, которая не имеет первообразных в классе элементарных функций:

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Функция ошибок определена на всей числовой прямой, является нечетной функцией x, имеет конечные предельные значения на бесконечности:

$$\lim_{x \to \pm\infty} \operatorname{erf} x = \pm 1.$$

Согласно (26)

$$(\operatorname{erf} x)' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}.$$

Производная всюду положительна, следовательно, функция ошибок монотонно возрастает. Ее график приведен на рис. 37.

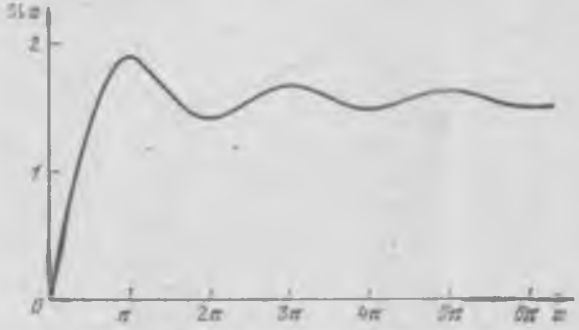


Рис. 36. График интегрального синуса.

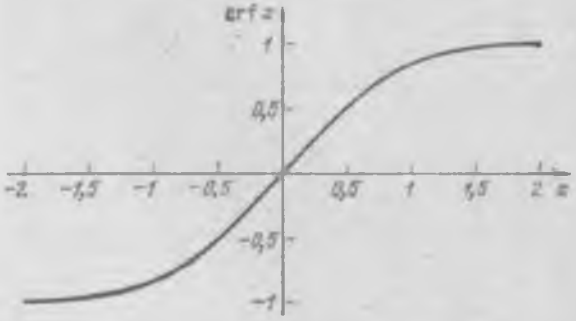


Рис. 37. График функции ошибок.

Существует ряд других специальных функций, которые вводятся как интегралы с переменным верхним пределом. Не будем останавливаться на их описании. Отметим лишь, что разобранные примеры показывают, насколько условно деление функции на элементарные и не элементарные. По существу, чтобы работать с какой-то функцией, нужно знать ее свойства и иметь алгоритм вычисления при любом значении аргумента. С этой точки зрения применение интегрального синуса или функции ошибок ничем не отличается от применения более привычных элементарных функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создатели первых ЭВМ ставили перед собой вполне определенную цель: с помощью полной автоматизации упростить и ускорить процесс вычислений. Эта задача была решена на основе принципа программного управления. Однако включение в систему команд наряду с арифметическими операциями операций передачи управления, хранение программы в виде чисел в оперативной памяти машины и связанная с этим возможность изменять программу в ходе вычислений позволили ЭВМ перешагнуть первоначальные рамки быстродействующего вычислительного автомата и превратили их в мощный, гибкий инструмент, широко применяемый в самых различных областях человеческой деятельности.

Мы уже говорили в главе 1 о математических моделях как о методе математического описания сложных процессов, систем, явлений, конструкций. ЭВМ, благодаря своему огромному быстродействию и логическим возможностям, позволяют провести всесторонний анализ этих моделей и получить детальную количественную информацию о свойствах изучаемого объекта. Данный метод исследования часто называют *вычислительным экспериментом*. Он стал в настоящее время одним из наиболее эффективных и универсальных способов познания законов реального мира и их использования в практической деятельности людей.

Вычислительный эксперимент имеет целый ряд преимуществ перед экспериментом реальным. Он значительно дешевле и доступнее. Во многих случаях вычислительный эксперимент позволяет глубже понять результаты реального эксперимента, сопоставить их с теорией. Часто вычислительный эксперимент проводится для планирования будущих экспериментов и прогнозирования их результатов, для проектирования экспериментальных установок следующего поколения и определения оптимальных режимов их работы. Вычислительный эксперимент совершенно незаменим при изучении таких сложных объектов, как космос,

человеческое общество, где постановка большого числа натуральных экспериментов либо затруднена, либо вообще невозможна.

Подчеркивая достоинства вычислительного эксперимента, нужно в то же время отметить его ограниченность. Мы знаем, что математическая модель всегда является упрощенным описанием реального объекта, что полученные с ее помощью результаты носят для изучаемого объекта приближенный характер. Установить пределы применимости математической модели, степень ее соответствия объекту можно только с помощью настоящего эксперимента (критерий практики). Вот почему, какими бы совершенными ЭВМ мы ни обладали, вычислительный эксперимент никогда не вытеснит обычный эксперимент. Будущее — за их разумным, гармоничным сочетанием.

ЭВМ — не только техническая база вычислительного эксперимента, одновременно они являются важным элементом реальных экспериментов. Высокий уровень автоматизации многих естественнонаучных экспериментов и способов регистрации их результатов позволяет получить в короткий срок весьма большой объем информации: десятки и сотни тысяч снимков, осциллограмм, показаний детекторов и т. д. Для интерпретации этой информации требуется сложная математическая обработка. Во многих случаях такую обработку необходимо проводить практически одновременно с экспериментом. Сделать это можно только с помощью ЭВМ.

Включение ЭВМ в общий экспериментальный комплекс потребовало создания эффективных численных методов решения математических задач, возникающих при обработке и интерпретации результатов эксперимента, и разработки реализующих эти методы программ. Пришлось также решать сложные технические проблемы сопряжения измерительной аппаратуры с устройствами ввода ЭВМ. Для полной автоматизации обработки важно, чтобы преобразование сигналов любой природы в систему чисел, понятную ЭВМ, осуществлялось автоматически, без участия человека.

Применение ЭВМ позволяет не только обрабатывать эксперимент, но с помощью системы обратных связей управлять им: поддерживать нужные значения параметров, определяющих его условия, менять параметры по заданному закону, вести поиск оптимальных режимов протекания процессов.

Очень быстро были оценены логические возможности ЭВМ, на которые стали обращать особое внимание при проектировании новых машин. ЭВМ стали применяться для логического анализа сложных объектов и ситуаций, для решения задач связанных с получением выводов из некоторой системы исходных предпосылок. Это стимулировало развитие математической логики. Характерным примером решения сложной логической задачи на ЭВМ является создание трансляторов для перевода программ с алгоритмического на машинный язык. Логические возможности ЭВМ позволили создавать программы для игры в шахматы, перевода с одного языка на другой, стихосложения и т. д. Возникли дискуссии, может ли машина «мыслить», проводилось обсуждение вопроса, что такое интеллект, творческая деятельность. Споры часто носили схоластический характер, потому что спорящие стороны вкладывали в одни и те же слова разный смысл. Однако они стимулировали изучение ЭВМ как мощного средства повышения интеллектуальных возможностей человека. То, что человек, вооруженный ЭВМ, интеллектуально сильнее человека без вычислительной машины, то, что человек с помощью ЭВМ сумел решить существенно более широкий круг задач, чем до их появления, сомнений не вызывало и не оспаривалось.

ЭВМ стимулировали развитие кибернетики — науки об общих законах управления. Машины начали широко применяться для управления сложными системами самой различной природы: производственными процессами, полетом космических ракет, естественнонаучными экспериментами и т. д.

На ЭВМ возложили диспетчерские функции в задачах, связанных с переработкой большого объема информации. Вычислительные машины широко используются для оптимальной организации перевозок (см. гл. 6), в информационно-поисковых системах по продаже авиационных и железнодорожных билетов, в системе библиотечного поиска.

Широкое применение получили ЭВМ в задачах проектирования и конструирования объектов самой различной природы: инженерно-строительных сооружений, самолетов и космических аппаратов, нефтяных промыслов, радиоэлектронной аппаратуры. Они не только ускоряют разработку проекта, повышают его качество и тем самым дают большой экономический эффект, но и решают задачи проектирования, анализ которых без ЭВМ оказался бы невозможен.

В качестве характерного примера можно привести проектирование самих ЭВМ, которое в настоящее время нельзя осуществить без применения ЭВМ. Рост логической сложности, внедрение новой элементной базы привели к тому, что даже целая группа высококвалифицированных специалистов не может удержать в памяти огромное количество связей внутри проектируемой машины. Поэтому работу по проведению связей поручают специальным программам трассировки, которые способны запомнить все существующие связи и по определенным правилам проводить новые. Когда проект готов, он проверяется с помощью моделирования на ЭВМ. Если проверка устанавливает, что проект работоспособен, то машина готовит необходимую техническую документацию для производства отдельных плат, узлов и связей между ними. Эта производственная документация представляет собой перфорированную ленту, которая вводится в программно-управляющее устройство, обеспечивающее технологический цикл производства новой вычислительной машины. В противном случае ЭВМ-«родитель» сообщает проектировщику об имеющемся дефекте. Проектировщик должен понять, в чем состоит ошибка задания, и исправить ее. Так диалог между проектировщиком и ЭВМ создает объединение удивительных творческих способностей человека с педантичностью, быстродействием и прекрасной памятью машины. Этим примером мы и закончим обсуждение темы, поскольку дальнейшее перечисление без анализа деталей и подробностей не сможет добавить существенно новой информации.

Широта и разнообразие областей применения ЭВМ, существенный прогресс, которого удается добиться всюду, где они начинают использоваться, существование проблем и проектов, которые вообще не могли бы развиваться без ЭВМ,— все это делает вычислительные машины одним из определяющих факторов научно-технического прогресса нашего времени.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автокод 91
Аддитивная система записи чисел 55
Адрес 59
Алгоритм 8, 27
— вычислительный 33
— Евклида 28
Алгоритмические языки 72, 91
— — высокого уровня 92
Антиградиентное направление 149
Аппаратное выполнение операций 100
Арифметико-логическое устройство ЭВМ 59
Ассемблер 97

Байт 71
Библиотека 100
Библиотекарь 101
Бит 68

Ведущий элемент 115
Вилки метод 40
Внешние устройства ЭВМ 62
Внешняя баллистика 19
— память ЭВМ 59
Внутренняя память ЭВМ 59
Выносной терминал 78
Вычислительная система 89
Вычислительный алгоритм 33
— комплекс 81
— эксперимент 183

Гаусса метод 114
Гипотеза 15
Гипотетическая модель 15
Градиент 149
Градиентного спуска метод 148

Двухслойные методы 120
Дисплей 79
Допустимое решение системы линейных алгебранческих уравнений 131

Евклида алгоритм 28
Евклидова норма 112
Евклидово пространство 113

Задание 104
Задача внешней баллистики 19
— линейного программирования 154
— об использовании ресурсов 156
— транспортная 154
Закрытый режим 44
Запоминающее устройство ЭВМ 59
Зейделя метод 123

Имя 91
Интеграл определенный 165, 169
Интегральная сумма 168
— схема 75
Интегральный синус 160
Интегрируемая функция 169
Итерации метод 43
Итерационная последовательность 43

Итерационные методы 114, 120
— параметры 120
Итерация 32

Каналы ввода-вывода 77
Каноническая форма 120
Касательных метод 48
Качества критерий 133
Квадратурные формулы 171
Килобайт 71
Код операции 63
Комплекс вычислительный 81
Компьютер персональный 85
Конус Маха 21
Коэффициент лобового сопротивления 17
Крамера формулы 113
Криволинейная трапеция 167
Критерий качества 133
— практики 15
Критические точки 137

Лагранжа формула 45
Линейное программирование 154
— пространство 112
Липшица постоянная 44
— условие 44
Лобовое сопротивление 16

Маневр 25
Математическая модель 8, 11
Математическое обеспечение ЭВМ 89
Матрица с диагональным преобладанием 124
— симметричная 122
Маха конус 21
Машинное слово 59
Машинно-ориентированный язык 91
Машинный язык 62
Мегабайт 71
Метка 91
Метод вилки 40
— Гаусса 114
— градиентного спуска 148
— Зейделя 123
— итераций 43
— касательных 48
— наискорейшего спуска 150
Метод Ньютона 48
— покоординатного спуска 147
— последовательных приближений 43
— простой итерации 122
Методы двухслойные 120
— итерационные 114, 120
— нестационарные 120
— неявные 121
— одношаговые 120
— прямые 114
— стационарные 120
— численные 33
— явные 121
Микрокомпьютер 84
Микрокомпьютерная система 85
Микрокомпьютеры однокристальные 85
Микропроцессор 64
Миникомпьютер 83
Многопроцессорная система 81
Многоэкстремальные функции 153
Модель гипотетическая 15
— математическая 8, 11
Модуль 102
Мониторные системы 104
Мультипрограммный режим 77, 105

Наискорейшего спуска метод 150
Направление антиградиентное 149
Неоднородный вычислительный комплекс 81
Непроцедурные языки 96
Нестационарные методы 120
Неявные методы 121
Норма евклидова 112
Нормальное решение приближенной системы 131
— — системы линейных алгебраических уравнений 129
Ньютона метод 48
Ньютона — Лейбница формула 169

Обусловленность матрицы 125
Однокристальные микрокомпьютеры 85
Однородный вычислительный комплекс 81
Одношаговые методы 120
Оперативная память 59
Оператор 94

Операционные системы 90, 104
Описание 94
Определенный интеграл 165, 169
Открытый режим 70

Пакет 102
— заданий 105
Пакетная обработка 74
— — заданий в мультипрограммном режиме 105
Пакеты прикладных программ 90, 102
Память оперативная 59
Параметры итерационные 120
Первообразная 170
Периферийное оборудование ЭВМ 61
Персональный компьютер 85
Перфокарты 60
Планировщик заданий 108
Подпрограмма 99
— стандартная 100
Позиционная система записи чисел 55
Покоординатного спуска метод 147
Положительно определенная матрица 122
Последовательность итерационная 43
Последовательных приближений метод 43
Постоянная Липшица 44
Практики критерий 15
Предел интегральных сумм 168
Прерывание 110
Прикладное программирование 89
Прикладные программисты 89
Проблемно-ориентированный характер пакета 102
— язык 91
Программа 59
— стандартная 99
—, управляющая вводом-выводом 108
Программирование линейное 154
— прикладное 89
— системное 89
Программисты прикладные 89
— системные 89
Программное выполнение операций 100
— обеспечение ЭВМ 89
Простой итерации метод 122
Пространство евклидово 113
— линейное 112
Прямоугольников формула 171
Прямые методы 114

Режим закрытый 44
— мультипрограммный 77, 105
— открытый 70
— разделения времени 77, 107
Рейнольдса число 17
Рекуррентная формула 30

Сеть ЭВМ 81
Симметричная матрица 122
Симпсона формула 175
Синус интегральный 180
Система вычислительная 89
— команд 62
— линейных алгебраических уравнений 112
— микрокомпьютерная 85
— многопроцессорная 81
— совместная 131
Системное наполнение пакета 102
— программирование 89
Системные программисты 89
Системы мониторные 104
— операционные 90, 104
— программирования 90
— реального времени 107
Слово машинное 59
Совместная система 131
Сопротивление лобовое 16
Стандартная подпрограмма 100
— программа 99
Стационарные методы 120
— точки 137
Сумма интегральная 168
Супервизор 108
Схема интегральная 75

Телетайп 78
Теорема Вейерштрасса 137
— о существовании корня непрерывной функции 36
— — сходимости итерационной последовательности 45
— — — метода касательных 50
— существования 37

Терминал выносной 18
Точки критические 137
— стационарные 137
Транслятор 73, 97
Транспортная задача 154
Трапеций формула 175
Трапеция криволинейная 167

Условие Липшица 44
Устройство ввода-вывода ЭВМ 59
— управления ЭВМ 59

Форма каноническая 120
Формула конечных приращений Лагранжа 45
— Лагранжа 45
— Ньютона — Лейбница 169
— прямоугольников 171
— рекуррентная 30
— Симпсона 175
— трапеций 175
Формулы квадратурные 171
— Крамера 113
— численного интегрирования 171
Функции многоэкстремальные 153
Функциональное наполнение пакета 102
Функция интегрируемая 169
Функция ошибок 180
— целевая 133

Целевая функция 133
Центральный процессор ЭВМ 61

Численного интегрирования формулы 171
Численные методы 33
Число Рейнольдса 17

Эксперимент вычислительный 183

Явные методы 121
Язык ассемблера 97
— машинно-ориентированный 91
— машинный 62
— проблемно-ориентированный 102
— управления заданиями 104
Языки непроцедурные 96
— программирования 91
— спецификаций 96
Ячейка памяти 59

Андрей Николаевич Тихонов
Дмитрий Павлович Костомаров

ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

Редактор *И. В. Викторенкова*
Техн. редактор *С. Я. Шкляр*
Корректоры *О. А. Бутусова, И. Я. Кришталь*

ИБ № 12306

Сдано в набор 26.03.84. Подписано к печати 91. 07. 84. Т-14880. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,08. Уч.-изд. л. 10,13. Тираж 55 000 экз. Заказ № 2855/293. Цена 65 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литерат.
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Набрано в Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первой Образцовой типографии имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054 Москва М-54, Валовая, 28
Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика» ул. Кирова, д. 25.

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ

117071 Москва В-71,
Ленинский проспект, 15

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

Соболь И. М. **Метод Монте-Карло**. 4-е изд., доп. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы.

В книге излагаются основные приемы метода Монте-Карло (метода статистических испытаний). Приводятся примеры разнообразных задач, решаемых этим методом.

Новое издание (3-е в 1978 г.) дополнено подробным рассказом о важнейших приемах моделирования.

Для лиц, интересующихся методом Монте-Карло.

Предварительные заказы на эту книгу принимаются без ограничений магазинами Книготорга и Академкниги.



$M = F \cdot l$

$E = m \cdot c^2$

U

U

U

ВЫДАЮЩИЕСЯ ФИЗИКИ МИРА

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ УКАЗАТЕЛ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОРДЕНА ЛЕНИНА
БИБЛИОТЕКА СССР ИМЕНИ В. И. ЛЕНИНА

ВЫДАЮЩИЕСЯ ДЕЯТЕЛИ МИРОВОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ УКАЗАТЕЛЕЙ

МОСКВА

Автор биографических очерков *С. И. ЕРЕМЕЕВА*

Составители библиографии: *М. М. ВИНОКУР, Д. С. НИКОЛАЕВ, М. А. РАЕВСКАЯ*

Редакторы: *И. М. КАУФМАН, А. Я. ЧЕРНЯК*

Научный редактор профессор *Б. Г. КУЗНЕЦОВ*

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОРДЕНА ЛЕНИНА
БИБЛИОТЕКА СССР ИМЕНИ В. И. ЛЕНИНА
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

58 г.

016:53(09)
В-496

ВЫДАЮЩИЕСЯ ФИЗИКИ МИРА

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

МОСКВА 1958

ОБР.

Библиотека Ун-та
№ 432 008
пер. Семашко

Б/К

Автор биографических очерков *С. И. ЕРЕМЕЕВА*

Составители библиографии: *М. М. ВИНОКУР, Д. С. НИКОЛАЕВ, М. А. РАЕВСКАЯ*

Редакторы: *И. М. КАУФМАН, А. Я. ЧЕРНЯК*

Научный редактор профессор *Б. Г. КУЗНЕЦОВ*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель настоящего биобиблиографического указателя — помочь широким кругам читателей ознакомиться с научным творчеством наиболее выдающихся физиков мира и указать литературу, которая поможет это первое знакомство углубить и расширить.

Составители хорошо сознают существенную неполноту указателя. Выдающихся физиков мира, конечно, значительно больше. Однако отсутствие научно-популярной литературы о многих физиках, в особенности о физиках, работающих в настоящее время, заставило ограничиться сравнительно небольшим числом имен.

Автор биографических очерков стремился к тому, чтобы в сжатой форме очертить круг важнейших проблем, которым была посвящена научная деятельность каждого физика, показать связь его работ с исследованиями его предшественников и современников, в самой общей форме определить значение его научного вклада в развитие мировой науки.

Значительные усилия были направлены также на то, чтобы все сколько-нибудь сложные вопросы физики излагались возможно более популярно. В ряде случаев это оказывалось делом весьма нелегким.

Все очерки расположены в хронологической последовательности, по году рождения ученых.

Библиографические материалы, которыми снабжен каждый очерк, состоят из следующих частей: труды ученого, литература о его жизни и деятельности, библиографические указатели литературы.

Труды каждого ученого располагаются по времени опубликования их на языке оригинала.

Списки литературы о жизни и деятельности ученых начинаются со статей из второго издания «Большой советской энциклопедии» ввиду широкой распространенности этого издания.

Вся последующая литература располагается в порядке возрастающей трудности и от работ общего характера к работам, посвященным отдельным проблемам или отдельным сторонам деятельности. При наличии до-

статочной литературы материал разбивается на группы: биография, воспоминания современников, литература по отдельным вопросам и т. д.

Преимущественное внимание везде уделено литературе по возможности новой, появившейся за последние годы. С нее обычно начинается ряд рекомендуемых материалов. Из литературы предшествующих лет, а также литературы дореволюционной отобраны только те работы, которые сохранили свое научное значение и в наши дни.

Широко использована периодика: научно-популярная («Наука и жизнь», «Знание — сила», «Физика в школе») и более специальная («Успехи физических наук», «Вопросы философии» и др.).

К сожалению, по ряду имен (Смолуховский, Планк, Ферми и др.) пришлось столкнуться с крайней недостаточностью литературы на русском языке.

Критическая оценка общих трудов по истории физики — таких, как известные труды Любимова, Розенбергера, Даннемана,— дана во «Введении».

Указатель рассчитан на широкие круги советской интеллигенции, изучающей историю физики в порядке самообразования, на преподавателей физики в средней школе, на студентов педагогических и других высших учебных заведений, на лекторов, занимающихся популяризацией научных знаний.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет в самых широких кругах читателей значительно вырос интерес к основным физическим принципам и к их историческому развитию. В период быстрого преобразования основ физической картины мира наука испытывает потребность «оглянуться» и ретроспективно оценить эволюцию своих понятий и концепций. Интерес к этой эволюции весьма характерен не только для ученых — теоретиков и экспериментаторов. Картина исторического развития основных понятий помогает лучше понять физическую сущность современных представлений, которая подчас исчезает в математическом аппарате новейших теорий. Может быть, наиболее широкий круг читателей, обращающихся в наши дни к литературе по истории физики,— это преподаватели средних школ. Они испытывают настоятельную потребность насытить преподавание физики конкретными образами ее корифеев, показать романтику многовековых поисков достоверных сведений о физических процессах, привить учащимся дух критического отношения к традиционным взглядам, сделать преподавание физики живым, интересным, увлекательным.

Но этого мало. В наши дни, когда физика стала мощным орудием преобразования смежных областей науки и многих отраслей техники, выросли кадры химиков, биологов, врачей, инженеров, систематически пользующихся физическими методами исследования, применяющих физические приборы в своей практической работе, интересующихся физикой и ее историей.

Все возрастающий интерес к истории физики вызвал появление значительного числа работ в этой области. Наряду с обзорными трудами и монографиями, посвященными тем или иным периодам в развитии физики, тем или иным ее областям и проблемам, растет литература о жизни и творчестве ученых-мыслителей. В этой литературе сравнительно легко разобраться исследователю, обладающему навыками библиографического анализа и отбора специальных работ. Но существуют широкие круги читателей, нуждающихся в библиографической помощи. Заинтересовавшись каким-либо экспериментом, законом, теорией, они часто хотят узнать о

жизни и творчестве физика, с именем которого связан этот эксперимент, закон или теория. Помочь этим читателям — задача предлагаемой серии кратких очерков и указателей литературы. Эти очерки и указатели не претендуют, разумеется, ни на историческую, ни на биографическую и библиографическую полноту. Историческая полнота потребовала бы, конечно, гораздо более обширного списка физиков. Биографическая полнота была бы связана с бо́льшими размерами очерков и, разумеется, с более обстоятельным, глубоким, основанным на первоисточниках анализом творческого пути корифеев физической науки. Библиографическая полнота означала бы привлечение всех основных, и притом не только русских, но и иностранных источников о жизни ученых, а также исчерпывающих библиографий их трудов. Это — задача исследовательских учреждений по истории науки, и отчасти она выполняется.

Можно надеяться, что публикуемые очерки и указатели литературы пробудят у читателей интерес к систематическому изучению истории физики. Было бы крайне желательно, чтобы, ознакомившись вкратце с жизнью и творчеством одного мыслителя, читатель переходил затем к литературе о его предшественниках и современниках, к знакомству с состоянием науки в период, когда работал этот мыслитель, а впоследствии и к более общим работам по истории физики. Поэтому здесь, в кратком вводном очерке, хотелось бы дать некоторые общие указания о наиболее распространенной литературе по истории физики в целом. Удобнее всего сгруппировать эти указания по основным историческим этапам развития физики.

Исходные идеи подлинно научного анализа эволюции физики, как и науки в целом, содержатся в классических работах основоположников марксизма-ленинизма. Когда в семидесятые годы прошлого века Энгельс приступил к систематическому изложению идей марксизма, противопоставляя такое изложение взглядам Дюринга, существенно важное значение имело философское обобщение естествознания и, в частности, физики. Вот почему в известной книге Фридриха Энгельса «Анти-Дюринг» такое большое место занимают материалы по истории физики.

Для истории физики особенно важны две главы первого отдела этого труда — пятая и шестая (Натурфилософия. Время и пространство. Натурфилософия. Космогония, физика, химия). Много замечаний, относящихся к истории физики, содержится и в других разделах «Анти-Дюринга».

Наряду с «Анти-Дюрингом», источником руководящих идей в истории физики является «Диалектика природы» Энгельса.

В «Диалектике природы» и в «Анти-Дюринге» рассматриваются крупнейшие открытия и обобщения классической физики. Особое внимание уделено принципу сохранения энергии.

В этом принципе Энгельс видит основу диалектико-материалистического представления о природе. Энгельс показывает, как, в противовес метафизическим тенденциям, в физике развивается и побеждает учение о связи различных форм движения, об их взаимных переходах, о качественных превращениях и количественной эквивалентности форм движения, о несводимости сложных форм к формам элементарным. Энгельс

дает глубокую историческую оценку физических идей древности, средневековья и нового времени. Диалектическое представление о единстве мира пронизывало античную науку. Впоследствии, когда в борьбе против средневековой схоластики выросло новое естествознание, эмпирические сведения и в частности экспериментальные данные о физических явлениях накоплялись внутри дифференцировавшихся отраслей науки. Энгельс показывает, как на основе исторически закономерной дифференциации знаний складывалось метафизическое представление об абсолютных границах в природе и о неизменности Вселенной, как само развитие науки ломало метафизическое представление о мироздании. С этой точки зрения в «Диалектике природы» и в «Анти-Дюринге» оцениваются великие физические открытия, на базе которых возникло классическое учение о теплоте, теория газов, электродинамика. Таким образом, работы Энгельса указывают историческое место каждого крупного физического открытия в построении научной картины мира.

Философским обобщением развития физики в последующий период является работа «Материализм и эмпириокритицизм», написанная В. И. Лениным в 1908 году.

Эта книга раскрывает действительный смысл физических открытий девяностых и девятисотых годов, показавших мир внутриатомных, а отчасти и внутриядерных процессов,— открытий, внесших в науку представление об электронах и положительно заряженных ядрах. Эти открытия вызвали революцию в физике. Разъясняя философское и историческое значение революции, преобразовавшей учение о веществе, Ленин вместе с тем оценивает открытия и обобщения, сделанные раньше. «Материализм и эмпириокритицизм» устанавливает исходные гносеологические позиции истории науки вообще и истории физики, в частности. Только с этих марксистско-ленинских позиций возможна подлинно научная разработка истории науки, понимание движущих сил и значение прогресса естественнонаучных и в том числе физических знаний. В противовес субъективно-идеалистическому представлению об истории науки, как «истории заблуждений», Ленин вслед за Марксом и Энгельсом видит в истории науки бесконечный процесс последовательного приближения к объективной истине.

Усвоение неисчерпаемого по своей глубине содержания упомянутых работ Энгельса и Ленина позволит читателю критически подойти к фактическому материалу, собранному в многочисленных работах по истории физики, понять подлинное значение описанных в этих работах экспериментальных открытий и теоретических обобщений, составить общее представление о том, как человечество в течение веков проникало в глубь физических явлений, преодолевало антинаучные догмы, использовало физические знания для расширения власти человека над природой.

Отметим наиболее распространенные монографии и обзорные работы по истории физики, сгруппировав их по основным историческим периодам.

Изучение физики древности имеет первостепенное значение для изучения истории культуры. В странах Древнего Востока, в древней Греции, в эллинистических государствах и, наконец, в Риме была сформулирована

гениальная идея единства мира, мысль о бесконечности пространства, о вечности материи, были высказаны идеи атомистики и вместе с тем учения о непрерывной среде. В древности были установлены такие важнейшие основы физики, как принцип рычага и некоторые исходные законы гидростатики.

Физические идеи древнего мира освещены в первых разделах следующих общих трудов по истории физики:

Любимов Н. А. История физики. Опыт изучения логики открытий в их истории. Ч. 1—3.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 1—3.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1—2.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1.

Значительный материал по истории физики содержится в книге

Даннеман Ф. История естествознания. Естественные науки в их развитии и взаимодействии. Т. 1—3.

Все эти труды написаны в различное время с различных идейных позиций и имеют различную познавательную ценность.

В обстоятельном труде Н. А. Любимова изложение часто ведется в виде пересказа классических трактатов. Любимов далек от научного представления о движущих силах прогресса физических знаний, да и круг известных в настоящее время фактов из истории физики значительно расширился за десятилетия, прошедшие после выхода его книги. Тем не менее чтение этой книги полезно каждому, кто хочет познакомиться с физическими идеями древности и средневековья, с содержанием трудов Галилея, Декарта, Ньютона, Гюйгенса и других корифеев физики XVII века. Само собою разумеется, что чтение этой книги должно быть дополнено знакомством с позднейшими трудами по истории физики. В отличие от труда Любимова история физики в труде Розенбергера доводится до XIX века включительно. Эта книга также не дает отчетливого представления о действительных, в частности, производственно-технических корнях прогресса физических знаний и классовых истоках различных идейных направлений в физике. В книге Розенбергера, кроме того, немало явных пробелов. Слишком недостаточно, в частности, отражена в ней деятельность выдающихся русских физиков XVIII—XIX вв. Поэтому необходимо изучение истории физики по книгам советских авторов. Знакомясь с последними, читатель может черпать дополнительные сведения в трудах Любимова, Розенбергера и Даннемана. Все это относится, конечно, не только к первым частям этих книг, но и к последующим.

Значительное внимание в этих трудах уделено развитию физических знаний в средние века. Однако необходимо иметь в виду, что после появления книг Любимова и Розенбергера значительно выросли и углубились сведения о физических идеях и экспериментах средневековья. Было найдено, опубликовано и прокомментировано большое число рукописей и забытых старых изданий.

При этом некоторые исследователи, исходя из религиозно-апологетических побуждений, старались преувеличить значение физических идей, высказанных средневековыми схоластами. Исторические исследования показали неправомерность таких попыток. Средневековая схоластика

сдерживала и искажала научный прогресс; расцвет естествознания и в особенности физики начался в эпоху решительного натиска новых общественных сил на твердыни средневековой схоластики. В течение средних веков в борьбе с богословской схоластикой физика накапливала силы для последующего расцвета. В течение средних веков не прекращалось, сначала на Востоке, а потом и в Европе, комментирование древнегреческой научной литературы. Правда, Аристотель, канонизированный католической церковью, был в значительной степени приспособлен к ее идеологическим потребностям. Но среди комментаторов Аристотеля находились люди, дополнявшие канонизированный текст идеями, почерпнутыми из практического опыта. Опыт, связанный, в частности, со средневековыми ремеслами, приводил к расширению эмпирической базы физики. В средние века появились уже и собственно физические эксперименты. Обзор развития физики этого времени содержится в соответствующих главах уже названных книг.

Основы современной физики были созданы в XVII веке. Работы Галилея содержали физические идеи, которые впоследствии были подтверждены трехвековым развитием науки. Физика Декарта наряду с фантастическими гипотезами содержала смелые и прогрессивные для своего времени мысли о механическом истолковании всех явлений природы. Во второй половине века, в ньютоновых «Математических началах натуральной философии» были сформулированы основы классической физики. В дальнейшем развитие физики, связанное с прогрессом производственной техники и с идейной борьбой в историческом интервале между английской и французской революциями, привело к генезису количественного эксперимента в различных областях физики, к таким важным теориям, как электростатика, и к таким широким обобщениям, как атомистическая концепция Ломоносова.

Физике XVII—XVIII вв. посвящены существенно важные разделы в перечисленных выше общих обзорах развития физики.

Можно упомянуть еще книгу:

К у з н е ц о в Б. Г. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв.

Классическая физика в собственном смысле была создана в период, охватывающий конец XVIII и почти весь XIX век. Развитие физики XIX века рассматривается в упомянутых выше книгах Розенбергера, Кудрявцева и Спасского, а также в книге Лауэ «История физики».

Общий анализ основных идей классической физики приводится в книге Б. Г. Кузнецова «Принципы классической физики».

Развитие физических знаний в России в XIX в. освещено в соответствующих главах книги «История естествознания в России», т. I.

В конце XIX века начинается новый период развития физики. Открытие радиоактивности и электронная теория были его началом. В XX веке теория относительности и квантовая механика преобразовали представления о пространстве, времени, полях и элементарных частицах. Важнейшие этапы развития неклассической физики излагаются в книге:

Э й н ш т е й н А. и И н ф е л ь д Л. Эволюция физики. Развитие идей

от первоначальных понятий до теории относительности и квант.

Известное место уделено в этой книге развитию классической физики; в целом, однако, она построена так, что краткий очерк развития классической физики служит лишь введением в теорию относительности и квантовых идей.

Историческое изложение новейшей теоретической физики дано также в книге:

К у з н е ц о в Б. Г. Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии.

Здесь перечислена лишь небольшая часть работ по истории физики. Более подробные сведения о них читатель найдет в библиографическом указателе.

ОБЩИЕ ТРУДЫ ПО ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Энгельс Ф. Анти-Дюринг. Переворот в науке, произведенный господином Евгением Дюрингом. М., Госполитиздат, 1957. 376 стр.

Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955. 328 стр.

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии. — Сочинения. Т. 14. 367 стр.

* * *

Иоффе А. Ф. Физика.— БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 7—16.

Сжатый обзор основных этапов развития физики от древности до наших дней.

Исторические обзоры развития крупнейших разделов физики читатель найдет в соответствующих томах «Большой советской энциклопедии»: механики (т. 27, стр. 362—368; авторы — Л. Г. Лойцянский и А. И. Лурье), гидромеханики (т. 11, стр. 311—318; автор Л. Г. Лойцянский), оптики (т. 31, стр. 95—102, автор — акад. Г. С. Ландсберг), электричества (т. 48, стр. 506—512; автор — С. М. Рытов), магнетизма (т. 25 стр. 610—616; автор — С. В. Вонсовский) и др.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1—2. М., Учпедгиз, 1956.

Т. 1. От древности до Менделеева. Изд. 2-е. 563 стр. с илл. и портр.

Т. 2. От Менделеева до открытия квант (1870—1900 гг.). 487 стр. с илл., портр.

В обоих томах дана история развития физических воззрений, история формирования основных понятий и концепций физики. Центральное место во втором томе занимает история возникновения и развития теории электромагнитного поля. Излагая историю развития наиболее важных проблем физики, автор показывает отражение этого развития в технике, в философии, в общественной жизни. Значительное внимание уделено развитию физики в СССР. Не ограничиваясь общим изложением работ русских ученых, автор в одной из глав дал очерк истории физики в России конца XIX века.

Рецензии на этот труд появились в следующих журналах: «Вопросы истории естествознания и техники», 1957, вып. 5, стр. 200—203; «Вестник высшей школы», 1957, № 5, стр. 87—90; «Физика в школе», 1957, № 6, стр. 80—86.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1. От древности до начала XIX века. М., Моск. ун-т, 1956. 359 стр., илл., портр.

Переработанный и дополненный курс лекций по истории физики, который читался автором на физическом факультете Московского университета. Книга состоит из четырех разделов: Развитие науки в древности и в средние века. — Научная революция XVI и начала XVII века. — Период образования физической науки. — Период раздельного изучения физических явлений (XVIII век).

Лакур П. и Аппель Я. Историческая физика. Пер. под ред. проф. О. Д. Хвольсона. Т. 1. Мироздание до 1630 года.— Свет.—Сила.—Мироздание после 1630 г.—Звук.—Природа света. М.—Л., Гос. изд., 1929. XVI, 470 стр. с илл., портр.

Лакур П. и Аппель Я. Историческая физика. Пер. с нем. под ред. «Вестника опытной физики и элемент. математики». Т. 2. Теплота.— Магнетизм.— Электричество до 1790 г.— Электрический ток.— Погода. Одесса, «Mathesis», 1908, [12], 434 стр. с илл.; 4 л. илл.

Популярные очерки по истории физики, доступные самым широким кругам читателей.

Розенбергер Ф. История физики. Пер. с нем. под ред. И. Сеченова, вновь провер. и переработ. В. С. Гохманом. Ч. 1—3. 1935—1937.

Ч. 1. История физики в древности и в средние века. Изд. 2-е. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937. 127 стр.

Ч. 2. История физики в новое время. Изд. 2-е. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937. 312 стр.

Ч. 3. История физики за последнее (XIX) столетие. Вып. 1. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит. и номографии, 1935. 302 стр.

Ч. 3. История физики за последнее (XIX) столетие. Вып. 2. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит. и номографии, 1936. 448 стр.

История физики в труде Ф. Розенбергера доведена до восьмидесятых годов XIX века. Каждому отделу книги предпослано введение, в котором охарактеризованы руководящие идеи каждого исторического периода, их взаимосвязь и дальнейшее направление. Раскрывая творчество отдельных ученых, автор приводит и краткие биографические сведения о них. Каждый том снабжен именным и предметным указателем. В конце второго выпуска третьей части дан общий указатель ко всем трем частям.

Любимов Н. А. История физики. Опыт изучения логики открытий в их истории. Ч. 1—3. Спб., 1892—1896.

Ч. 1. Период греческой науки. 1892. [6], VI, 264 стр. с илл.

Ч. 2. Период средневековой науки. 1894. [4], 206 стр.

Ч. 3. Физика в XVII веке. Отд. 1. Эпоха опыта и механической философии. 1896. [4], 694 стр. с илл.

Обширный труд профессора Московского университета Н. А. Любимова (1830—1897) ценен главным образом богатством фактического материала, а также обилием приведенных в его «Истории физики» отрывков из малодоступных изданий трудов ученых.

Начало Отдела 2-го третьей части напечатано в «Журнале министерства народного просвещения», 1897, апр. с. 1—48; май, с. 49—80; июнь, с. 81.

Даннеман Ф. История естествознания. Естественные науки в их развитии и взаимодействии. Т. 1—3. 1932—1938.

Т. 1. От зачатков науки до эпохи возрождения. Пер. со 2-го нем. изд. А. Г. Горнфельда. Под ред. М. Л. Левина и О. Ю. Шмидта. М., Медгиз, 1932. 432 стр. с илл.

Т. 2. От эпохи Галилея до середины XVIII века. Пер. со 2-го нем. изд. П. С. Юшкевича. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 408 стр. с илл.; 6 л. портр.

Т. 3. Расцвет современного естествознания до установления принципа сохранения энергии. Пер. с нем. П. С. Юшкевича. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1938, XII, 357 стр.; 15 л. портр.

Трехтомный труд известного немецкого популяризатора естествознания Фридриха Даннемана дает широкую картину развития естествознания «от зачатков науки» до второй половины XIX века (дальнейший обзор, составляющий содержание четвертого тома, в переводе на русский язык не появился). История физики излагается в связи с развитием всех отраслей естествознания.

История естествознания в России. Под ред. Н. А. Фигуровского, В. П. Зубова, С. Р. Микулинского. Т. 1, ч. 1—2. М., Акад. наук СССР, 1957. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

Ч. 1. [Развитие естествознания в России до XVIII века.— Развитие естествознания в России в XVIII веке]. 495 стр. с илл.; 6 л. илл. и карт.

Ч. 2. [Развитие естествознания в России в первой половине XIX века]. 380 стр. с илл.; 1 л. портр.

В обеих частях первого тома освещается развитие важнейших отраслей естествознания — математики, механики, астрономии, физики, химии, геологии, географии и биологии до начала 60-х годов XIX столетия. Рассказано о жизни и научной деятельности М. В. Ломоносова, Г. В. Рихмана, Леонарда Эйлера, Ф.-У. Эпинуса, В. В. Петрова, Э. Х. Ленца. История физики в России излагается в тесной связи с общим развитием мировой науки. В конце второй части тома приводится библиография использованной литературы.

Лауэ М. История физики. Пер. с нем. Т. Н. Горнштейн. Под ред. и со статьей И. В. Кузнецова. М., Гостехиздат, 1956. 230 стр.; 1 л. портр.

В небольшом очерке автор коснулся наиболее важных и сложных проблем развития физической науки. Книга проникнута глубоким убеждением в объективной реальности внешнего мира, в объективной ценности научного знания.

В приложениях напечатана автобиография Лауэ — «Мой творческий путь в физике» (стр. 165—200).

Эйнштейн А. и **Инфельд Л.** Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квант. Пер. с англ. со вступит. статьей С. Г. Суворова. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1956. 279 стр.

Кузнецов Б. Г. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв. М., Акад. наук СССР, 1955. 344 стр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

Главы книги: 1. Гелиоцентризм и создание механической картины мира. 2. Картезианская физика. 3. Учение Ньютона о материи, движении и силе. 4. Атомистика

Кузнецов Б. Г. Принципы классической физики. М., Акад. наук СССР, 1958. 324 стр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

Главы книги: 1. Введение. 2. Принцип относительности. 3. Принцип наименьшего действия. 4. Принцип сохранения энергии. 5. Принцип необратимости. 6. Принцип близкодействия.

Кузнецов Б. Г. Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. М., Акад. наук СССР, 1957. 328 стр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

ВЫДАЮЩИЕСЯ ФИЗИКИ МИРА

№ 432008

2—179

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Для более полного ознакомления с работами по истории физики и с литературой о творчестве отдельных физиков могут быть использованы библиографические указатели:

История естествознания. [Т. 1—2]. М.—Л., Акад. наук СССР, 1949—1955.

Т. 1. Литература, опубликованная в СССР (1917—1947). Библиография сост.: О. А. Старосельской-Никитиной (руководитель работы), О. В. Красноуховой и Ю. Д. Каценельсоном. Отв. ред. Д. Д. Иванов и Н. А. Фигуровский. 1949. 519 стр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания. Фундам. б-ка обществ. наук).

Т. 2. Литература, опубликованная в СССР (1948—1950). Библиография сост. О. А. Старосельской-Никитиной (руководитель работы), О. В. Красноуховой, В. И. Макаровой, Л. В. Каминер и П. В. Пильщиковой. Отв. ред. А. Т. Григорьян, Д. Д. Иванов, Н. А. Фигуровский. 1955. 395 стр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники. Фундам. б-ка обществ. наук).

Оба указателя охватывают литературу по истории всех отраслей естествознания: сочинения классиков марксизма-ленинизма; работы по истории естествознания в целом и по истории отдельных наук; собрания сочинений крупнейших ученых и научные публикации классических работ; материалы об ученых: биографии, характеристики деятельности, юбилейные статьи, некрологи и пр.; обзорную литературу по отдельным отраслям науки и научным учреждениям.

Материалы к библиографии по истории русской науки. [Вып. 1]. Физика. Сост. Р. П. Гаухман. Под ред. проф. Н. А. Капцова. М., 1948. 131 стр. (Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч. б-ка им. А. М. Горького).

Указатель дореволюционной и советской литературы до 1947 года. Основные разделы: Общие обзоры. — Физика в научных учреждениях. — Обзорные работы по отдельным разделам и проблемам физики.

В последнем, наиболее крупном разделе приводится литература о 162 русских физиках XVIII—XX вв.

Савелова В. Е. Библиографический указатель по истории физики и техники.— В кн.: Савелова В. Е. Вопросы истории физики и техники в курсе физики средней школы. Л., Учпедгиз, 1956, стр. 176—191.

Частично аннотированный указатель книг и статей (главным образом из журнала «Физика в школе»). Разделы указателя: 1. Общие руководства по истории физики и техники. 2. История развития отдельных разделов и вопросов физики и техники. 3. Литература о жизни и деятельности ученых и инженеров. 4. Труды классиков физики.

Кауфман И. М. Русские биографические и биобиблиографические словари. [Изд. 2-е, доп.]. М., Госкультпросветиздат, 1955. 751 стр.

Указатель биографических и биобиблиографических словарей. Разделы указателя: общие словари; словари деятелей науки, литературы и искусства; краевые словари; словари псевдонимов. Кроме словарей, в указатель включены также некоторые сборники биографий и биографические серии. Значительное место в указателе занимают работы по истории науки.

АРХИМЕД

(ок. 287 — 212 до н. э.)

Настоящий сборник биографических очерков справедливо открыть именем Архимеда — великого мыслителя древности, гениального математика и механика, который одним из первых показал силу математического метода в обработке опытных данных, обобщил обширный эмпирический материал, почерпнутый из техники, и заложил теоретические основы статики и гидростатики.

«Кто овладел творениями Архимеда...,— писал о нем Лейбниц,— будет меньше удивляться открытиям самых великих людей нашего времени».

Выдающийся теоретик, Архимед прославился также как талантливейший изобретатель и конструктор.

Сведения о жизни Архимеда довольно скудны. Он родился около 287 года до н. э. в г. Сиракузах (Сицилия) в культурной и знатной, но, по-видимому, небогатой семье греческого астронома Фидия.

Попытки отца ввести сына в круг своих научных интересов не увенчались успехом: раннее увлечение математикой и особенно механикой определило иной путь Архимеда. Получив дома первоначальные математические знания, он затем продолжительное время жил и учился в Александрии—крупнейшем научном центре античного мира. Его учителями были последователи знаменитого геометра Евклида. Под влиянием трудов Евклида выработался и научный метод Архимеда, отличавшийся строгостью и точностью. Возвратившись в Сиракузы, Архимед всецело посвятил себя математике и механике, а также их техническим приложениям— изобретению машин и механизмов. Математические труды Архимеда, несмотря на огромный промежуток, отделяющий наше время от времени их появления, свидетельствуют о необычайной силе мысли и глубине научной интуиции их автора. Достаточно сказать, что во многих своих вычислениях Архимед применял расширенный и углубленный им «метод исчерпания», предвосхитивший интегральное исчисление. Вместо примитивной греческой системы счета с громоздкой буквенной записью чисел Архимед

предложил счет по разрядам и порядкам, позволяющий удобно записывать любые числа (именно такой является наша современная система счета, корни которой уходят в древнюю Индию).

Архимед впервые вывел точные выражения длины окружности, площади круга и его частей через радиус, а также выражение площади сегментов параболы. Он нашел знаменитое своей простотой и гармоничностью соотношение объемов цилиндра и вписанных в него шара и круглого конуса (3 : 2 : 1) и завещал начертать это на его надгробии как одно из наиболее поразивших его открытий.

Гениальные исследования Архимеда только теперь, при колоссально выросшем математическом аппарате, читаются специалистами более или менее без труда, тогда как еще лет 200 назад (т. е. через 2000 лет после их появления) они вызывали немалые затруднения даже у видных математиков.

Древние историки говорят об Архимеде прежде всего как о великом геометре. Однако гений Архимеда в полной мере проявил себя и в физике.

Еще в Александрии, в сочинении «О рычагах», написанном около 260 года до н. э., Архимед сделал одно из своих величайших открытий—нашел закон рычага: обратно пропорциональную зависимость между весами тел и длинами плеч рычага. Рычагом пользовались задолго до Архимеда, но закон, найденный им, вскрыл невиданные возможности этого простейшего механизма в преодолении больших сопротивлений малой силой. Именно в связи с этим открытием Архимед, по словам древнегреческого историка и математика Паппа Александрийского (III в. до н. э.), воскликнул: «Дай мне место, на которое я мог бы встать, и я сдвину Землю».

Доказывая закон рычага, Архимед впервые ввел одно из важнейших понятий статики, получившее впоследствии наименование «момента силы». Многие выдающиеся физики нового времени (Галилей, Стевин, Гюйгенс) пытались усовершенствовать доказательство Архимеда, но, как писал о них Лагранж, «...нарушив простоту доказательства Архимеда, они почти ничего не выиграли с точки зрения точности»[1]. Попытки самого Лагранжа в этом направлении также не дали существенных результатов.

Архимеду принадлежит и открытие знаменитого закона, названного позже его именем и лежащего в основе современной гидро- и аэростатики. Закон Архимеда заключается, как известно, в том, что на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости. Этот закон содержится в семи положениях трактата «О плавающих телах». В том же сочинении Архимед впервые исследовал вопрос об устойчивости плавающих тел. Через 2000 лет Лагранж писал: «Эта книга является одним из прекраснейших памятников гения Архимеда, она содержит в себе теорию устойчивости плавающих тел, к которой современные ученые прибавили очень немного»[2].

Большую научную ценность сохранили до наших дней 2 книги Архимеда «О равновесии плоских фигур», где он теоретически определил цент-

---

[1] Лагранж Ж. Аналитическая механика. Изд. 2-е. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 19.

[2] Там же, стр. 236.

ры тяжести треугольника, параллелограмма, трапеции и различных сегментов параболы, а также доказал некоторые общие теоремы о центрах тяжести плоских фигур. В этом сочинении заложены основы статики.

К сожалению, почти ничего неизвестно о не дошедшем до нас оптическом труде Архимеда «Катоптрика». По словам римского архитектора Витрувия (I в. до н. э.) и греческого математика и историка Феона Александрийского (IV в. н. э.), в этой работе были затронуты вопросы об отражениях в плоских, вогнутых и выпуклых зеркалах, о зажигательных способностях вогнутого зеркала, явлениях радуги, двойного солнца, рефракции в воде и в атмосфере. Возможно, именно это сочинение породило легенду об уничтожении Архимедом неприятельского флота при помощи зажигательных стекол.

Архимед жил в «золотой век геометрии», как называют историки III век до н. э. в Греции. В этот период античная геометрия, некогда возникшая из землемерных расчетов, быстро развивалась, становясь все более строгой и абстрактной. Абстрактные, теоретические положения, в основном чисто умозрительного характера, проникли в механику. Однако в это время начался и обратный процесс: в механике рос интерес к конкретным выводам, рождавшимся в повседневной практике технических работ. Это нашло свое отражение прежде всего в трудах Архимеда, а затем Витрувия, Герона (I. в. н. э.) и др.

Труды Архимеда по механике при всей их глубокой абстрактности, при крайней требовательности в отношении строгости доказательств были преимущественно связаны с практическим приложением теоретических выводов, с требованиями производства и общественной жизни. Открыв винтовую линию, Архимед создал так называемый бесконечный винт. В настоящее время этот «архимедов винт» применяется для передачи вращения из одной плоскости в другую, перпендикулярную ей, а также для перемещения твердых сыпучих тел в горизонтальном направлении [1].

Архимед не был астрономом, но и здесь его ум и изобретательность оставили замечательный след. Им была сооружена модель небесной сферы, поражавшая не одно поколение и после Архимеда. Судя по многочисленным ее описаниям, в том числе по рассказу Цицерона (I в. до и. э.), с ее помощью можно было демонстрировать смену фаз Луны, движение планет, солнечные и лунные затмения. Архимед посвятил ей свое единственное сочинение по астрономии (не дошедшее до нас) «Об изготовлении небесных сфер». Он построил также прибор для измерения диаметра Солнца.

Когда находившиеся под гнетом Римской империи Сиракузы присоединились к выступившему против Рима Карфагену и когда создание мощного оружия стало необходимостью для маленького Сиракузского государства, Архимед показал себя выдающимся военным инженером-изобретателем и создал невиданные в те времена военные машины. По рассказу Плутарха, эти машины наводили ужас на римлян и сыграли существенно важную роль в обороне города. Марцелл — один из виднейших римских полководцев — лишь после многомесячной осады и только благодаря

[1] Простейшим примером его является всем известная мясорубка.

предательству смог взять Сиракузы. При взятии этого города Архимед погиб. Имя его на родине было забыто почти на полтора столетия.

В 75 году до н. э. Цицерон разыскал заросшую бурьяном могилу Архимеда по высеченным на колонне шару и цилиндру.

Время и войны уничтожили и эту эпитафию... Однако и через два тысячелетия гениальные открытия величайшего физика и математика древности продолжают жить не только в благодарной памяти человечества, но и в повседневной практике современной науки и техники.

ТРУДЫ АРХИМЕДА

Произведения Архимеда издавались несколько раз. В 1544 году в Базеле вышло первое собрание его трудов, которое принято называть «главным изданием». В 1792 году в Оксфорде вышло собрание «всех сохранившихся» работ Архимеда. В 1880—1881 гг. известным датским историком науки И. Л. Гейбергом (1854—1928) было подготовлено и осуществлено новое издание трудов Архимеда в двух томах (Лейпциг). В 1910—1913 гг. вышло второе, дополненное переиздание этого собрания, также под редакцией И. Л. Гейберга, справедливо считающееся в настоящее время наиболее полным и наиболее совершенным собранием произведений Архимеда.

I. Дошедшие до нас сочинения Архимеда: 1) Две книги о шаре и цилиндре; 2) Измерение круга; 3) О коноидах и сфероидах; О спиралях; 5) Две книги о равновесии плоскостей; 6) Исчисление песчинок; 7) Квадратура параболы; 8) Послание Эратосфену о некоторых теоремах механики; 9) Две книги о плавающих телах; 10) отрывок из книги математического содержания под названием «Игра».

II. Сочинения, до нас не дошедшие: 1) Сочинение о многогранниках; 2) Книга арифметического содержания, называвшаяся, по-видимому, «Принципы», «Начала»; 3) Сочинения по механике; одно из них, как будто, называлось «О весах» или «О рычагах»; 4) Катоптрика — сочинение, посвященное отражению и преломлению световых лучей; 5) Об изготовлении небесных сфер.

На русском языке собрания сочинений Архимеда не существует. Изданы лишь отдельные его произведения. Вопросам механики и физики посвящены следующие работы:

Послание Архимеда к Эратосфену о некоторых теоремах механики. — В кн.: Гейберг И. Новое сочинение Архимеда... Пер. с нем. под ред. «Вестника опытной физики и элемент. математики». С предисл. прив.-доц. И. Ю. Тимченко. Одесса, «Матезис», 1909. 42 стр. (Б-ка классиков точного знания).

«Послание к Эратосфену» представляет собою большой отрывок из сочинения Архимеда, обнаруженный И. Л. Гейбергом в 1906 году в Константинополе и впервые им опубликованный в 1907 году. Содержание и значение этой работы освещено в указанных ниже книгах о творчестве Архимеда: В. Ф. Кагана (стр. 41—43) и С. Я. Лурье (стр. 143—149 и др.).

До выхода отдельным изданием (1909) эта работа была напечатана в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1907, № 445, стр. 14—17; № 450—451, стр. 106—110; № 455—456, стр. 209—223.

О плавающих телах.—В кн.: Начала гидростатики. Архимед. Стевин. Галилей. Паскаль. Пер., примеч. и вступит. статья А. Н. Долгова. Изд. 2-е, доп. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 89—115.

Перевод с латинского языка трактата Архимеда об условиях равновесия плавающих тел. Во вступительной статье — об этапах развития гидростатики и значении работ Архимеда в создании основных законов этой отрасли механики. В примечаниях — обзор переводов трактата на разные языки.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ АРХИМЕДА

Лурье С. Я. Архимед.—БСЭ, 2-е изд., т. 3, 1950, стр. 184—186, портр.

Некрасов И. А. Архимед. — «Наука и жизнь», 1938, № 11—12, стр. 103—108, илл.

Веселовский И. Архимед — математик и инженер. — «Техническая книга», 1938, № 10, стр. 96—99, илл.

Каган В. Ф. Архимед. Краткий очерк о жизни и творчестве. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехиздат, 1951, 56 стр., илл.; 2 л. илл.

Популярно написанная книга, которую можно рекомендовать широким кругам читателей с подготовкой в объеме средней школы.

Лурье С. Я. Архимед. М.—Л., 1945. 271 стр. с илл. (Акад. наук СССР. Науч.-попул. серия. Биографии).

Наиболее крупная на русском языке работа об Архимеде. Главы книги: Эллинистическая Греция в годы детства и юности Архимеда. — «Начала» и «Конические сечения» Евклида.—Александрийский музей.—Начало научной деятельности Архимеда.—Архимед в Сиракузах. — Архимед и Демокрит. — Архимед при дворе Гиерона. Рим и Карфаген.—Поздние работы Архимеда. Борьба с Римом. Гибель Архимеда.—Архимед в истории математики.

Лурье С. Я. Архимед и его время. — В кн.: Труды юбилейной научной сессии (Ленингр. гос. ун-та). Секция исторических наук. Л., 1948, стр. 178—201.

Статья существенным образом дополняет указанную книгу того же автора. Основное внимание уделено «главным образом исторической стороне проблемы». Многие положения аргументированы более обстоятельно, «чем это было возможно в книге, предназначенной главным образом для математиков и физиков». Биография Архимеда представлена на широком историческом фоне.

Веселовский И. Н. Архимед. М., Учпедгиз, 1957. 112 стр. с илл. (Классики физики).

Книга является продуктом самостоятельного исследования автором дошедших до нас произведений Архимеда. Используя новые материалы, автор хотел, во-первых, дать «такое популярное изложение, которое могло бы быть усвоено школьниками старших классов, и, во-вторых, дать характеристику Архимеда, которая могла бы добавить новые черты к его облику».

В работе устанавливается также ряд новых фактов, представляющих интерес и для специалистов — историков физико-математических наук.

Чвалина А. Архимед. Пер. с нем. В. И. Контовта. М.—Л., Гостехиздат, 1934. 48 стр. с илл.

Жизнь Архимеда (очень кратко), его место в истории науки, труды в области алгебры, геометрии и механики. Образцы текстов из сочинений Архимеда.

Предполагается знакомство с элементами высшей математики.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юношн. лит., 1937, стр. 5—20, илл.

Глава: Архимед.

В популярном пересказе соответствующих страниц из трудов Архимеда, Витрувия, Лукиана, Плутарха, Полибия приводится разбор некоторых теорем, доказанных Архимедом, некоторых открытых им законов, выполненных опытов—по гидростатике, оптике («зеркала Архимеда»), описание построенных им военных машин.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 45—47, 58—63.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 60—66.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 1, стр. 56—61 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 1, стр. 181—191, 242—259.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 1, стр. 157—172.

* *
*

По вопросу о дошедших до нас изображениях Архимеда интересные сведения приводятся в статье А. В. Цингера, педагога и автора широко распространенных в свое время учебников по элементарной физике:

Цингер А. В. О портретах Архимеда.— «Математика и физика в школе», 1936, № 4, стр. 29—31, илл.

Исследовав все существующие портреты Архимеда, автор приходит к выводу, что ни одного достоверного изображения великого ученого до нашего времени не сохранилось. Существующие бюсты, медали и картины, изображающие Архимеда, являются плодом художественной фантазии живописцев и скульпторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Лурье С. Я. [Труды Архимеда и литература об Архимеде]. — В кн.: Лурье С. Я. Архимед. М.—Л., Акад. наук СССР, 1945, стр. 258—266.

Издания текста Архимеда и старые латинские переводы.—Лучшие переводы Архимеда на новые языки. — Избранная литература об Архимеде. — Работы об Архимеде на русском языке и русские переводы трудов Архимеда.

Жизнь Архимеда (очень кратко), его место в истории науки, труды в области алгебры, геометрии и механики. Образцы текстов из сочинений Архимеда.

Предполагается знакомство с элементами высшей математики.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юношл. лит., 1937, стр. 5—20, илл.

Глава: Архимед.

В популярном пересказе соответствующих страниц из трудов Архимеда, Витрувия, Лукиана, Плутарха, Полибия приводится разбор некоторых теорем, доказанных Архимедом, некоторых открытых им законов, выполненных опытов—по гидростатике, оптике («зеркала Архимеда»), описание построенных им военных машин.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 45—47, 58—63.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 60—66.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 1, стр. 56—61 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 1, стр. 181—191, 242—259.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 1, стр. 157—172.

* *
*

По вопросу о дошедших до нас изображениях Архимеда интересные сведения приводятся в статье А. В. Цингера, педагога и автора широко распространенных в свое время учебников по элементарной физике:

Цингер А. В. О портретах Архимеда.— «Математика и физика в школе», 1936, № 4, стр. 29—31, илл.

Исследовав все существующие портреты Архимеда, автор приходит к выводу, что ни одного достоверного изображения великого ученого до нашего времени не сохранилось. Существующие бюсты, медали и картины, изображающие Архимеда, являются плодом художественной фантазии живописцев и скульпторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Лурье С. Я. [Труды Архимеда и литература об Архимеде]. — В кн.: Лурье С. Я. Архимед. М.—Л., Акад. наук СССР, 1945, стр. 258—266.

Издания текста Архимеда и старые латинские переводы.—Лучшие переводы Архимеда на новые языки. — Избранная литература об Архимеде. — Работы об Архимеде на русском языке и русские переводы трудов Архимеда.

ВИЛЬЯМ ГИЛЬБЕРТ

(1540—1603)

Вильям Гильберт жил в начале великой эпохи Возрождения, пришедшей на смену средневековью. В средние века учения древних философов-идеалистов, прежде всего Аристотеля, были превращены с благословения церкви в незыблемую догму, сковывавшую живую мысль. Такое догматическое направление в науке, получившее название схоластики, господствовало еще и в XV—XVI вв. Вместе с тем развитие производства толкало к изучению различных явлений природы, а далекие торговые путешествия и большие географические открытия приносили новые и новые сведения о природе, которые противоречили священному писанию и учению Аристотеля. Гильберт был одним из первых исследователей, которые решительно выступили против схоластики, за новое естествознание, где критерием истины является опыт.

Вильям Гильберт родился в 1540 году [1] в г. Кольчестере в семье главного городского судьи, учился в Кэмбридже и Оксфорде, а затем занялся врачебной практикой. Двадцати лет Гильберт получил ученую степень баккалавра, в 1564 году—степень магистра искусств, в 1569—степень доктора медицины. Гильберт славился своим врачебным искусством и последние годы жизни состоял лейб-медиком королевы Елизаветы Тюдор.

Однако научные интересы его выходили далеко за пределы медицины. Он глубоко интересовался химией, и первые его работы были посвящены химическим исследованиям. Гильберт обладал большими познаниями в астрономии и одним из первых выступил с защитой передового учения Коперника[2]. Но основной областью его исследований была физика, где Гильберт впервые научно подошел к изучению магнитных и электрических явлений и где он впервые сформулировал и применил метод опытного исследования, под которым, в отличие от своих предшественников, понимал не просто наблюдение, а наблюдение, проверяемое экспериментом.

[1] Некоторые источники (меньшинство) называют годом рождения Гильберта 1544.
[2] В VI книге его сочинения «О магните...» (см. ниже).

Результаты своих многолетних исследований по магнетизму и электричеству Гильберт изложил в большом труде «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле», который впервые был опубликован в 1600 году в Лондоне. Электрическим явлениям посвящена лишь одна глава этого трактата, состоящего из шести книг.

В предисловии к нему Гильберт выступил со страстным обличением схоластов — тех, «кто поклялся соблюдать верность чужим мнениям», отчего «...множество... заблуждений... передано по наследству, как бы из рук в руки...» «Древним, которые были как бы родителями философии — Аристотелю, Феофрасту, Птолемею, Гиппократу, Галену,— писал Гильберт,— всегда следует воздавать подобающий им почет, так как от них распространилась и дошла до потомков мудрость. Но и наше время открыло и вывело на свет многое такое, что охотно приняли бы и они, будь они живы» [1].

Значительность научного вклада Гильберта становится понятной, если вспомнить, что в его время знания о магнитных явлениях были крайне скудны и переплетались с самыми фантастическими измышлениями, вплоть до того, что действие магнита прекращается, если натереть его чесноком, что он может помирить мужа и жену и т. п. Основные сведения о действии магнитов относились к компасу — одному из наиболее древних приборов, который хорошо знали приморские народы.

Чудесное свойство магнитной стрелки компаса постоянно устанавливаться в направлении с юга на север долгое время приписывалось действию Полярной звезды или даже целого созвездия Большой Медведицы. Правда, было замечено различие в поведении стрелки компаса на разных широтах — на экваторе стрелка располагалась горизонтально, а чем дальше к северу, тем все более заметно наклонялась северным концом к земле. Все это свидетельствовало о том, что источник притяжения стрелки находится в Земле, однако никто до Гильберта не исследовал этого вопроса.

В своем трактате Гильберт рассмотрел все известные свойства магнитов и описал огромное число своих собственных опытов. Почти за три века до работ Пьера Кюри он установил, что магнитные свойства железа исчезают, если его раскалить. Он открыл, что действие магнита ослабевает, если заслонить его листом железа, усовершенствовал приборы для наблюдений магнитных явлений и т. д. Но в основном исследования Гильберта в области магнетизма были направлены на изучение свойств магнитной стрелки компаса с целью объяснить и практически использовать различное поведение стрелки в различных точках земного шара. Для этого Гильберт проделал множество опытов над взаимодействием магнитной стрелки и шарообразного магнита. Ранее Гильберта, еще в XIII веке, опыты с таким магнитом осуществил французский ученый П. Перегрин. Помещая намагниченную иглу на поверхности шара в разных его местах, он таким образом находил полюсы шарового магнита (ему же принадлежит введение понятия магнитного полюса). Гильберт вместо иглы употребил подвижную стрелку на острие, что позволи-

---

[1] Гильберт В. «О магните...» М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 8—10.



Вильям Гильберт

ло более детально изучить ее поведение вблизи шарового магнита. Он ввел новые понятия — магнитная ось, магнитные меридианы и параллели.

Еще до описания этих опытов, в последней главе I книги своего трактата, Гильберт высказал мысль, что поведение стрелки компаса можно объяснить магнитными свойствами самой Земли. Опыты с шарообразным магнитом, который Гильберт называл терреллой (маленькой землей), блестяще подтвердили его догадки. Магнитная стрелка обнаруживала вблизи терреллы наклонение, величина которого изменялась подобно тому, как это происходило на Земле. После опытов с терреллой Гильберт (в VI книге) сделал окончательный вывод, что Земля представляет собою громадный магнит. Этот вывод является самой большой научной заслугой Гильберта. Исключительно смелый для своего времени он впоследствии был подтвержден бесчисленными наблюдениями и прочно вошел в науку.

Захваченный своим открытием, Гильберт хотел объяснить магнитными свойствами Земли даже ее вращение. Это заключение было ошибочным. Однако интересно отметить, что в начале XX века физики вновь обратились к вопросу о связи между вращением тела и его магнитными свойствами, но они стремились доказать уже обратное,— что вращение тела возбуждает в нем магнитные свойства. Много внимания уделил этому вопросу П. Н. Лебедев, пытавшийся объяснить таким путем происхождение земного магнетизма, которое и в настоящее время еще не изучено до конца.

Еще со времени Фалеса Милетского (VII—VI вв. до н. э.) было известно другое загадочное явление — притяжение натертым янтарем легких сухих тел. Явление это объясняли наличием у янтаря души и т. п.; многие считали его разновидностью магнетизма. Во времена Гильберта известны были подобные свойства и у агата.

Несмотря на то, что электрическим явлениям в трактате Гильберта посвящено лишь несколько страниц, значение этих исследований Гильберта также очень велико. Ими Гильберт положил начало электростатике. Он исследовал десятки веществ (драгоценные камни, сталь, серу, сургуч, стекло, каменную соль и др.) и открыл у большинства из них свойства, подобные свойствам янтаря и агата. Основной заслугой Гильберта в этой области является то, что он впервые выделил явление притяжения тел к янтарю и другим телам при их натирании в совершенно особый класс явлений, отличных по своей природе от явлений магнитных. Причину электрических притяжений Гильберт впервые назвал электрической силой. Для обнаружения ее у различных тел он применил немагнитную стрелку на острие, которая поворачивалась при приближении к ней наэлектризованного тела. Это был первый прототип электроскопа. При помощи своего электрического указателя Гильберт впервые заметил, что стрелка его к электрикам «...на близких расстояниях притягивается сильнее» [1]. Он установил, что электрические притяжения происходят по прямым линиям, что наэлектризованные тела теряют способность

[1] Там же, стр. 89.

притягивать при их нагревании, а также в случае увлажнения их или окружающего воздуха.

Пытаясь объяснить природу электрической силы, Гильберт рассмотрел и отверг все существовавшие раньше мнения об особом родстве между притягиваемыми телами и янтарем и т. п. В своих многочисленных опытах он обратил внимание на то, что все тела, которые ему удавалось наэлектризовать, находились вначале в жидком состоянии (например, янтарь некогда был жидкой смолой). Исходя из этого, Гильберт сделал вывод о существовании особой, очень тонкой и разреженной «электрической влаги», при истечении которой из наэлектризованного тела происходит притяжение к нему различных других тел. Исчезновение электрических свойств при нагревании и обжигании электриков он объяснял испарением электрической влаги.

Во времена Гильберта, когда науки об электрических явлениях еще не существовало, когда янтарю серьезно приписывали живую душу, эта попытка объяснить электрические свойства тел при помощи представлений об особой, но совершенно реальной физической материи была, несомненно, прогрессивной. Так вошло в естествознание представление об электрической жидкости, породившее впоследствии целую эпоху «невесомых флюидов», когда электрические, магнитные, тепловые явления пытались объяснить присутствием в телах особых невесомых жидкостей— электрической, магнитной, тепловой (теплород). В наши дни от этих теорий остались такие выражения, как «поток» электричества, тепла и т. п. Однако в истории науки все эти представления сыграли, хотя и временную, но положительную роль.

Интересно отметить, что проведенное Гильбертом разделение магнитных и электрических явлений, которое привело в XVII—XVIII вв. к интенсивному развитию учения как о магнитных, так и об электрических явлениях, оказалось также временным. В первой четверти XIX века Ампер уже на новой научной основе показал единство этих явлений. При этом оказалось, что не электрические явления представляют собою разновидность магнетизма, а, напротив, магнетизм имеет электрическую природу.

Значение трактата Гильберта «О магните» далеко не сразу было понято и оценено. До конца XIX века он был малодоступным, так как издавался только на латинском языке. В Англии сочинение Гильберта почти не было известно вплоть до 1900 года, когда по инициативе В. Томсона клубом имени Гильберта (создан в 1889 г.) был издан английский перевод трактата.

Гильберт умер 30 ноября 1603 года от чумы. Все свои многочисленные приборы и большую библиотеку он завещал научному обществу «Коллегия врачей», президентом которого состоял последние три года жизни. К сожалению, все эти материалы погибли во время большого лондонского пожара в 1666 году.

ТРУДЫ В. ГИЛЬБЕРТА

Гильберт В. О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов. Пер. с лат. А. И. Доватура. Ред., статьи и коммент. А. Г. Калашникова. М., 1956. 412 стр., илл.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ В. ГИЛЬБЕРТА

Гильберт У. (1540—1603).— БСЭ, 2-е изд., т. 11, 1952, стр. 371.

Радовский М. И. Вильям Гильберт и создание учения об электричестве.— «Физика в школе», 1946, № 2, стлб. 42—58.

Краткие биографические сведения. Основные идеи главного труда Гильберта «О магните». Место Гильберта в истории науки.

Уильям Гильберт. К 350-летию со дня смерти.— «Электричество», 1953, № 12, стр. 63—65 (подпись: Д. Р.).

Роль Гильберта в создании учения о магнетизме и электричестве.

Калашников А. Г. Вильям Гильберт и научное значение его труда «О магните».— В кн.: Гильберт В. О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле... М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 315—363.

Содержательный, хорошо написанный очерк. Автор говорит об эпохе Гильберта, о характере средневекового естественнонаучного мышления, о среде, из которой вышли зачинатели нового естествознания. Вильям Гильберт характеризуется как первый и наиболее яркий представитель новых идей и направлений в изучении природы, а его труд — «как первый исторический документ», открывающий собой эпоху прогрессивного развития физики как опытной науки. После краткого изложения важнейших идей Гильберта приводится библиография изданий его трактата «О магните».

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юношл. лит., 1937, стр. 83—86.

Краткие биографические сведения. Книга Гильберта «О магните». Некоторые из опытов, описанных в этой книге.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 189—191.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 173—179, 195, 213, 220—221.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 65—71, 100.

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 209—215.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 87—94, 113, 120 и др. (см. именной указатель).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники. (Учебник для энергетических и электротехнических вузов и факультетов). М.—Л., Госэнергоиздат, 1956, стр. 117—119, 137.

ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ

(1564—1642)

Великий итальянский ученый Галилео Галилей, гениальный физик и астроном, один из основателей современного естествознания, родился 15 февраля 1564 года в г. Пизе, в обедневшей дворянской семье. Отец его был композитором, теоретиком музыки и математиком. До 11 лет Галилей посещал школу в Пизе, а затем, с переездом семьи во Флоренцию, был отдан для обучения в монастырь Валломброза. Здесь он впервые познакомился с сочинениями греческих и латинских авторов. Семнадцати лет Галилей поступил в Пизанский университет, где некоторое время изучал медицину. Однако несравненно бо́льший интерес вызывали в нем математика и физика. Галилей самостоятельно изучил физику Аристотеля, с увлечением читал сочинения Эвклида и особенно Архимеда. В 1584 году, оставив медицину, он возвратился во Флоренцию и целиком отдался изучению геометрии и механики. Первая научная работа Галилея — «Маленькие весы» — относится к 1586 году (напечатана впервые в 1665 г.) и посвящена описанию изобретенных им гидростатических весов, при помощи которых можно было быстро определять состав металлических сплавов. Здесь же Галилей изложил свое исследование о центрах тяжести телесных фигур. Это сочинение сразу принесло 22-летнему Галилею известность среди ученых.

В 1589 году Галилей занял кафедру математики в Пизанском университете, а через три года уехал в Падую, где до 1610 года был профессором знаменитого Падуанского университета.

Читая в университете лекции по математике и астрономии, Галилей вынужден был излагать официальные взгляды того времени — объяснял физику по Аристотелю, обосновывал геоцентрическую систему мира Птолемея, опровергая тем самым учение Коперника. И лишь немногие близкие друзья ученого знали другого Галилея — смелого мыслителя, пытливого исследователя природы, не признающего слепой веры в авторитеты. Свои действительные научные взгляды и идеи Галилей высказывал лишь в

письмах к друзьям, не решаясь выступить с ними публично в условиях разгула церковной реакции: сожжение в 1600 году на костре инквизиции замечательного философа-материалиста Джордано Бруно было событием еще совсем недавним.

Падуанский период был наиболее плодотворным в жизни ученого. В это время оформились его основные идеи в области механики. В Падуе Галилей сделал свои знаменитые астрономические открытия, окончательно убедившие его в справедливости гелиоцентрической системы Коперника. Эти открытия совершили переворот во взглядах на строение Вселенной и поколебали основы господствовавшего мировоззрения. Они имели огромное значение для всего естествознания и были подлинным знамением той великой эпохи — эпохи Возрождения, которая, как писал Энгельс, «сломила духовную диктатуру папы, ...разбила границы старого мира и впервые, собственно говоря, открыла Землю. Это была величайшая из революций, какие до тех пор переживала Земля»[1].

В Италии эпоха Возрождения началась еще в XIV—XV вв. Однако во времена Галилея эта страна, состоявшая из многих мелких самостоятельных государств, утратила свое былое могущество в связи с перемещением — после открытия Америки — главных торговых путей и переживала экономический и политический упадок. Ослабление неокрепшей еще итальянской буржуазии привело к возрождению феодальной реакции и еще большему усилению католической церкви. С середины XVI века по всей стране развернула свою деятельность сеть трибуналов инквизиции, беспощадно вытравлявшей из умов все, что шло вразрез со священным писанием. Однако остановить начавшийся процесс освобождения науки от церковной схоластики было уже невозможно. Эта эпоха дала миру немало ученых-героев, мужественных борцов за науку и новое мировоззрение. Галилей был в первых рядах этого бессмертного авангарда человечества.

В 1609 году Галилей впервые в истории науки использовал усовершенствованную им подзорную трубу — первый телескоп — для изучения небесных объектов. До Галилея все выводы ученых о строении Вселенной опирались лишь на наблюдения невооруженным глазом, а также на общие философские и религиозные догматы. Телескоп Галилея впервые показал грандиозность и сложность окружающего мира. Млечный путь, представляющийся невооруженному глазу бледной туманной полосой, при рассмотрении его в телескоп оказался колоссальным скоплением звезд. В начале 1610 года Галилей открыл четыре спутника у Юпитера. Это воочию показало, что Земля не является центром вращения всех небесных тел.

Эти первые астрономические открытия Галилея, опубликованные в 1610 году в его «Звездном вестнике», произвели огромное впечатление на современников, но в то же время вызвали резкие нападки со стороны схоластов и церковников.

Свои астрономические наблюдения Галилей продолжил во Флоренции, куда, по приглашению тосканского герцога Козимо II Медичи, он пе-

---

[1] Энгельс Ф. Диалектика природы, 1955, стр. 152.



Галилео Галилей

реехал в 1610 году. Во Флоренции Галилей был назначен «придворным философом» и «первым математиком» университета без обязательства читать лекции.

В 1611 году Галилей, телескоп которого к тому времени давал увеличение уже в 32 раза, впервые открыл углубления и возвышенности на поверхности Луны и наблюдал пятна на Солнце, что разрушило представление об особом, совершенном небесном мире с небесными телами идеальной сферической формы. Тогда же Галилей открыл вращение Солнца, фазы Венеры и впервые обнаружил кольцо Сатурна в виде загадочных выступов по бокам планеты, которые он принял за ее спутников. В отличие от планет звезды в телескоп все представлялись точками, что явилось первым свидетельством их колоссальной удаленности от Земли.

Флорентинский период в жизни Галилея был вначале спокойным. Римская церковь еще не разглядела той огромной опасности для ее учения, которая таилась в системе Коперника и особенно в подтверждавших ее правильность открытиях Галилея. В Ватикане разделяли всеобщее признание Галилея как одного из крупнейших ученых. В 1611 году он ездил в Рим и был принят в члены так называемой Академии деи Линчеи (Академии «рысьеглазых», т. е. ученых, научная зоркость которых позволяет им, подобно рыси, видеть то, что недоступно зрению обычных людей).

Однако уже с 1612 года, когда стали известны некоторые письма Галилея о солнечных пятнах, где он защищал коперниканские взгляды, на него начались доносы в инквизицию. В 1615 году Галилей вынужден был поехать в Рим для объяснения с папой и оправдания своей деятельности в глазах церкви. В 1616 году учение Коперника было официально запрещено, а его знаменитое сочинение «Об обращении небесных сфер» внесено в список (папский «Индекс») запретных книг. Галилею было сделано строгое предупреждение с предложением изменить свои научные взгляды.

Лишь после 1623 года, когда папой стал кардинал Барберини (под именем Урбана VIII), бывший в дружбе с Галилеем и особенно высоко ценивший его заслуги, Галилей решил, что наступило время, когда он снова может публично высказать свои научные идеи. В 1630 году он получил от папы официальное разрешение на печатание своего нового сочинения «Диалог о приливах и отливах» с условием, однако, представить систему Коперника лишь как одно из возможных теоретических построений. В 1632 году это сочинение Галилея было опубликовано во Флоренции под окончательным названием «Диалог о двух главнейших системах мира». Несмотря на жесткую цензуру, которой подверглось это сочинение, Галилей выступил в нем с основательной, аргументированной защитой учения Коперника. Более того, вслед за Джордано Бруно Галилей признавал бесконечность Вселенной и множественность миров в ней. Следует отметить, что именно Галилею принадлежит мысль о бесконечной структурности Вселенной — мысль, позднее, в XVIII веке, положенная в основу теории так называемой иерархической Вселенной, по которой каждая небесная система входит в состав системы более высокого порядка (звезды — в галактики, галактики — в метагалактики и т. д.). Эта теория разделяется многими учеными и в настоящее время (в начале

XX в. она была детально разработана шведским астрономом Шарлье).

Появление «Диалога» вызвало ярость церковников. На Галилея был сделан новый донос. В 1633 году его вызвали в Рим и предали суду инквизиции.

В результате почти трехмесячных угроз и запугиваний, после трех допросов 69-летнего ученого заставили публично в одной из церквей Рима, стоя на коленях, прочесть текст отречения от своих убеждений. Галилею запретили впредь писать что-либо о Земле как планете и о Вселенной. «Диалог» был внесен в папский «Индекс».

Удивительные астрономические открытия Галилея, его выступления с защитой коперниканских взглядов в эпоху церковной реакции, его ореол мученика науки — все это затмило на время другие стороны деятельности великого мыслителя и, в частности, его труды в области механики. Между тем механикой Галилей занимался с самого начала своей научной деятельности. В письме к одному из своих друзей он писал, что считает успехи в занятиях по механике самым ценным плодом своих исследований за всю свою жизнь.

Чтобы оценить всю грандиозность вклада Галилея в механику, необходимо хотя бы кратко обрисовать состояние этой науки в его время.

Среди ученых еще со времени Аристотеля господствовало представление, что существуют так называемые «насильственные» движения тел и «естественные», определяемые самой природой тела. Всем небесным телам приписывалось «естественное» идеальное равномерное движение по кругу; на Земле для одних тел «естественным» движением считалось прямолинейное движение вниз (в силу присущего им свойства тяжести), другим, не обладавшим, по мнению Аристотеля, тяжестью,— прямолинейное вверх. При этом скорость падения тела под действием тяжести считалась зависящей от веса тела. Из так называемых «насильственных» движений внимание ученых издавна привлекало движение тел, брошенных под углом к горизонту (например, пушечного ядра). Полагали, что в этом случае тела движутся в начале и в конце пути прямолинейно, а в середине — по дуге некоторой окружности. Таково было состояние науки о движении.

Еще в Пизе, в начале 90-х гг., в одном из первых своих сочинений — «Диалоге о движении» — Галилей выступил против физики Аристотеля. Как и многие другие, это сочинение Галилея сохранялось в рукописи и было напечатано лишь в 1854 году. По свидетельству ученика и биографа Галилея Винченцо Вивиани, Галилей уже в 1590 году установил независимость скорости свободного падения тел от их веса.

В Падуе Галилей закончил другое свое сочинение — «Трактат о механике», посвященный статике (впервые напечатано в 1634 г. во французском переводе). К падуанскому периоду (1592—1610) относится открытие Галилеем прямой пропорциональности между скоростью и временем при свободном падении тел и установление того факта, что тела, брошенные под углом к горизонту, движутся по параболе. В эти же годы Галилей провел важное исследование простых механизмов. В основу этих исследований он положил впервые четко сформулированное им так назы-

ваемое «золотое правило механики» («что выигрывается в силе, то теряется в скорости»), представляющее собою частный случай важнейшего принципа механики — принципа возможных перемещений. В общем виде этот принцип был сформулирован Лагранжем в 1788 году.

В 1612 году, во Флоренции, Галилей в сочинении «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и тех, которые в ней движутся» применил к выводу условий равновесия в жидких телах развитый им принцип равных моментов Архимеда (правило равновесия рычага). В этой же работе он впервые выступил открыто в печати против аристотелевой физики.

В 1632 году Галилей подытожил свои открытия в области механики в знаменитом «Диалоге о двух главнейших системах мира» — сочинении, которое, помимо своего громадного значения в истории астрономии, сыграло неменьшую роль и в развитии механики.

В «Диалоге», главным образом в первом его разделе («Первом дне»), Галилей развил идеи кинематики, возникшие у него еще в Падуе. В основу своего учения о движении (кинематике) он положил оказавшиеся чрезвычайно плодотворными идею непрерывности движения (непрерывного изменения скорости при неравномерном движении), идею сложения сил и впервые четко сформулированную им идею относительности движения.

Сравнивая движение тел на плывущем и неподвижном кораблях, Галилей пришел к выводу, что механические движения происходят совершенно одинаково в неподвижной системе и системе, движущейся равномерно и прямолинейно. Этот так называемый принцип относительности Галилея является одним из основных принципов классической, нерелятивистской механики, т. е. механики, рассматривающей движение тел со скоростями, далекими от скорости света, и не учитывающей времени взаимодействия тел (в течение которого действие от одного тела распространяется к другому).

В «Диалоге» Галилей впервые четко определил понятия скорости и ускорения. В задаче о свободном падении тел он впервые вполне осознанно воспользовался принципом инерции, хотя и не дал еще полной формулировки его, что сделал позднее Ньютон.

Идеи Галилея в области механики получили свое дальнейшее развитие в его классическом труде «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению». Это сочинение было вершиной научного творчества Галилея как физика. Появление «Бесед» свидетельствовало, что расправа инквизиторов с гениальным ученым не сломила его духа. Осужденный на молчание и домашний арест в местечке Арчетри под надзором инквизиторов, без права посещать даже рядом расположенную Флоренцию, Галилей не сдался. Еще до опубликования «Бесед» в не доступных папской власти протестантских странах был вновь напечатан запрещенный «Диалог» (в Германии, Англии и Голландии).

«Беседы» Галилея впервые были напечатаны в 1638 году в Голландии.

В первой части этого сочинения, названной механикой, или учением с

машинах, Галилей впервые изложил статику в связи с учением о сопротивлении материалов.

Вторую часть Галилей назвал наукой о местном движении (впоследствии она получила название динамики). Здесь Галилей, опираясь на свои экспериментальные исследования, провел глубокий анализ равноускоренного прямолинейного движения, первый дал точное определение этого вида движения и установил его законы. Обобщая результаты своих опытов, Галилей показал, что свободное падение тела, а также движение его вдоль наклонной плоскости являются равноускоренными движениями. Он установил также, что при движении тела вдоль наклонной плоскости ускорение зависит только от величины наклона, а конечная скорость, как и при свободном падении тела, определяется высотой начального положения тела (высотой наклонной плоскости).

В этом же сочинении, рассматривая движение тел, брошенных под углом к горизонту, как результат сложения равномерного прямолинейного движения тела и его свободного падения, Галилей установил основные закономерности этого сложного движения. Применив к скоростям правило параллелограмма, Галилей дал метод расчета траекторий для любых углов вылета снаряда и для любых значений его начальной скорости. В частности, он правильно указал, что наиболее эффективным при стрельбе из орудий является угол вылета снаряда, равный 45°.

В «Беседах» Галилей предложил первую в истории науки теорию маятника. Он доказал, что если в маятнике пренебречь весом нити, ничтожно малым по сравнению с весом качающегося тела, то квадраты периодов маятников относятся, как длины их. Галилей установил основной закон качания маятника при малых амплитудах, а именно изохронность качаний, т. е. независимость периода качаний от амплитуды. На примере движения маятника Галилей наглядно показал независимость скорости свободного падения от веса тел.

В «Беседах» же Галилей впервые рассмотрел вопрос о влиянии трения на движение тел. В этом сочинении Галилей затронул и ряд вопросов из других областей физики — доказал весомость воздуха, установил ряд основных закономерностей звучания струн.

Ему же принадлежит изобретение «термоскопа» — первого прибора для сравнения теплоты тел.

Несмотря на то, что Галилей в совершенстве владел общепринятым среди ученых того времени латинским языком, его основные работы написаны на родном, итальянском языке. Сочинения Галилея отличались живым, образным языком и разили противника меткой и острой иронией.

В последние годы жизни Галилей тяжело болел, в 1637 году он ослеп. Но до конца своих дней великий мыслитель не оставлял научных исследований. Согласно утверждению Вивиани Галилей в 1641 году сообщил своим ученикам и сыну об изобретении им маятниковых часов. К сожалению, ни вскоре умерший сын его, ни ученики Галилея не продолжили работу над этим изобретением. Появлением современных часов мы обязаны знаменитому голландскому ученому Гюйгенсу.

Галилей умер 8 января 1642 года. Кроме сына и невестки, а также трех его учеников — Кастелли, Вивиани и Торричелли, у смертного ложа

великого преобразователя физики неотступно находились два представителя инквизиции. Даже после смерти Галилея церковь продолжала преследовать его. Прах Галилея не разрешили поместить в семейном склепе. С трудом удалось получить разрешение похоронить его в часовне, примыкавшей к церкви. Лишь в 1737 году, т. е. через 95 лет после смерти, было исполнено последнее желание Галилея: его останки были перевезены во Флоренцию. Могила Галилея находится рядом с могилами двух других великих сынов Италии — Микеланджело и Данте.

ТРУДЫ ГАЛИЛЕЯ

Галилей Г. Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся.— В кн.: Начала гидростатики. Архимед. Стэвин. Галилей. Паскаль. Пер., примеч. и вступит. статья А. Н. Долгова. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 213—362.

Галилей Г. Послание к Франческо Инголи (1624). Пер. и примеч. проф. Н. И. Идельсона.— В кн.: Галилео Галилей. 1564—1642. Сборник, посвященный 300-летней годовщине со дня смерти Галилео Галилея. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 142—190.

В этом произведении Галилеем утверждается относительность всех тех понятий и мероопределений, которые средневековая наука считала самоценными и абсолютными. Галилей приводит ряд примеров из механики, опровергающих теории неподвижности Земли и подтверждающих коперниканскую систему мира.

Галилей Г. Диалог о двух главнейших системах мира, птолемеевой и коперниковой. Пер. с предисл. и примеч. А. Н. Долгова. М.—Л., Гостехиздат, 1948. 379 стр. с илл.; 1 л. портр.

Галилей Г. Сочинения. Т. 1. Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению... с приложением о центрах тяжести различных тел. Пер. С. Н. Долгова. Предисл. и примеч. А. Н. Долгова. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934. 696 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики естествознания).

В примечаниях приводится обзор изданий «Бесед» Галилея на разных языках.

Галилей Г. «Звездный вестник», «Разговоры о двух великих мировых системах», «Рассуждения о двух новых учениях в механике». (Избранные места). Прил. к журналу «Вестник знания». Сост. Я. И. Перельман. Со вступит. статьей Ю. П. Шеина. Л., Леноблиздат, 1931. 63 стр. с илл. (Классики мировой науки).

В приложениях: «Приговор кардиналов над Галилеем» и «Акт отречения Галилея».

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ ГАЛИЛЕЯ

Биографии. Общая литература

Вавилов С. И. Галилей Галилео. (1564—1642).— БСЭ, 2-е изд., т. 10, 1952, стр. 125—130, портр.

Луизов А. В. Галилей.— «Наука и жизнь», 1939, № 2, стр. 55—59.

Егоршин В. Галилео Галилей. (К 375-летию со дня рождения). — «Советская наука», 1939, № 2, стр. 91—106.

Более полно о жизни и деятельности Галилея рассказано в работах:

Цейтлин З. А. Галилей и его эпоха.— «Мироведение», 1933, № 6, стр. 4—30.

Научная деятельность Галилея. «Рассуждения и математические обоснования, посвященные двум новым наукам, касающимся механики и местных движений». «Диалог о двух важнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой».— Литература о Галилее (на русском и иностранных языках).

Анцелиович Е. С. Галилео Галилей. (Элементы физики). М., Учпедгиз, 1955. 100 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики физики).

Очерк состоит из трех частей: «Время, в которое жил Галилей», «Научная деятельность Галилея», «Разбор основных тем по физике Галилея». На стр. 46—51 приводится аннотированный перечень главных научных трудов Галилея. На стр. 52— библиография литературы о нем, изданной на русском языке (15 назв.).

Стеклов В. А. Галилео Галилей. Берлин, Гос. изд. РСФСР, 1923. 103 стр.; 1 л. портр.

Жизнь Галилея, научная деятельность, место в истории науки.

Автор книги—крупный советский математик, академик (1863—1926).

Цейтлин З. А. Галилей. М., Жургазобъединение, 1935. 304 стр.; 4 л. илл. и портр. (Жизнь замечат. людей. Серия биографий).

Наиболее крупная биография Галилея. Разделы книги: Подготовка к борьбе. — Начало борьбы. — Под игом декрета папской цензуры. — Инквизиционный процесс и осуждение Галилея. — Галилей — пленник инквизиции. — Важнейшие документы инквизиционного процесса Галилея. — Приложения.

Выгодский М. Я. Галилей и инквизиция. Ч. 1. Запрет Пифагорийского учения. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934. 216 стр. с илл.; 10 л. илл. и портр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории науки и техники).

Историческое исследование, основанное на широком круге источников.

* *
*

Араго Ф. Галилей.— В кн.: Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Пер. Д. М. Перевощиков. Т. 1. Спб., 1859, стр. 55—89.

Первая часть этой биографии посвящена жизнеописанию Галилея; вторая знакомит с содержанием главных его сочинений и с судьбой его неопубликованных рукописей.

Ассонов В. Галилей перед судом инквизиции. Очерк его жизни и трудов. С прил. портр. и факс. М., 1870. VI, 139 стр.; 2 л. илл.

Маракуев Н. Н. Галилей, его жизнь и ученые труды. Изд. 5-е, просмотр. и испр. С портр. Галилея и 15 рис. в тексте. М., 1907. 129 стр. с илл.; 1 л. портр.

Предтеченский Е. А. Галилей, его жизнь и научная деятельность. Спб., 1891. 95 стр.; 1 л. портр. (Жизнь замечат. людей. Биогр. б-ка Ф. Павленкова).

Пергамент О. Я. Галилео Галилей, его жизнь и научная деятельность. М., Гросман и Кнебель, 1897. 70 стр. (Вопросы науки, искусства, литературы и жизни. № 13).

* *
*

Идельсон Н. И. Галилей и Ньютон.— «Наука и жизнь», 1934, № 3. стр. 17—23; № 4—5, стр. 5—11.

Сопоставление имен Галилея и Ньютона отнюдь не вызвано одним лишь хронологическим совпадением. В статье говорится о них совместно потому, что «оба они дали науке и природе ее незыблемый фундамент» — учение о движении и силах. Статья состоит из следующих частей: 1. Галилей как астроном. 2. Наука о движении. 3. Новая наука Галилея. 4. Тяжесть. 5. Великие трудности. 6. На разных путях. 7. Ньютонова «Система мира». 8. У истоков науки.

Дьердь Н. Прогрессивные черты научной мысли Галилея.— В кн.: Историко-астрономические исследования. Вып. 2. М., Гостехиздат, 1956. стр. 247—265.

Галилей как мыслитель. Методологические принципы Галилея. Галилей о творческой науке. Мысли Галилея о научной методологии.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юношш. лит., 1937, стр. 97—134.

Глава: Галилео Галилей.

Популярно, по трудам Галилея и трудам его первых биографов, описаны опыты и открытия Галилея в области физики: законы качания маятника, опыты с наклонной плоскостью, закон инерции, закон относительности движения, наблюдение над поднятием воды в длинном насосе и др. Описанию опытов и наблюдений предшествует краткий биографический очерк и хронологический перечень наиболее крупных открытий Галилея в области физики и механики.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 106—135.

Глава 5: Галилей и его борьба за новое мировоззрение.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 113—133.

Глава: Галилео Галилей.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 145—155, 231—236 и др. (см. именной указатель).

Розенбергер Ф. История физики.

Ч. 1, стр. 117, 119, 122 и др. (см. именной указатель).

Ч. 2, стр. 19—36, 52—57, 76—82 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 1—197.

Галилею посвящены в книге три главы: 1. Наука в Италии к началу XVII века. Галилей. 2. Диалог Галилея о двух системах мира и его осуждение. 3 Процесс Галилея.

Галилею посвящены также главы этого труда, напечатанные в «Журнале министерства народного просвещения» (см. выше, стр. 12).

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 27—73.

Глава 3: Галилей и его творчество.

Ольшки Л. История научной литературы на новых языках. Т. 3. Галилей и его время. Пер. с нем. А. Ф. Коган-Бернштейн и П. С. Юшкевича. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933. 324 стр.; 3 л. портр.

Обширное исследование жизни и творчества Галилея — гуманиста, крупнейшего мастера итальянской прозы, великого ученого, оставившего яркий след во многих отраслях науки, стойкого борца за утверждение коперниканской системы, создателя выдающейся научной школы.

Галилей и отдельные отрасли науки

Крылов А. Н. Галилей как основатель механики.— В кн.: Галилео Галилей. 1564—1642. Сборник, посвященный 300-летней годовщине со дня смерти Галилео Галилея. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 56—67.

То же: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. 1, ч. 2. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 218—226.

Чтобы с наибольшей ясностью показать, в чем заключается величие дела Галилея, основавшего ту механику, «которой мы пользуемся до нашего времени», академик А. Н. Крылов начинает свою статью с разбора важнейших положений господствовавшей до Галилея механики Аристотеля. Убедительно показано различие методов: метафизического — у Аристотеля, научно-экспериментального — у Галилея. В качестве примера приводится ход опытов Галилея по изучению падения тел — опытов, «произведенных при помощи самых простых средств, но точных благодаря удивительно остроумной их постановке».

Егоршин В. Галилей в истории механики.— «Вестник Ком. акад.», 1935, № 1—2, стр. 55—58.

Труды Галилея по механике характеризуются в статье со стороны их научного метода и их жизненности. Отмечается, что Галилей использовал в этих работах приемы художественной прозы, сочетая «высокое качество научного слова с мастерством художника». Перечисляются проблемы, поставленные Галилеем в его работах по механике.

Каценельсон Ю. Д. К трехсотлетию классической работы Галилея.— «Физика в школе», 1938, № 4, стр. 1—7.

Труд Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки для развития механики», его содержание и значение.

Долгов А. Н. Краткий очерк истории гидростатики.— В кн.: Начала гидростатики. Архимед. Стэвин. Галилей. Паскаль. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 13—88.

Анализу работ Галилея в области гидростатики посвящены в этом очерке стр. 62—88.

Вавилов С. И. Галилей в истории оптики.— В кн.: Галилео Галилей 1564—1642. Сборник, посвященный 300-летней годовщине со дня смерти Галилео Галилея. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 5—56.

Особенности научной деятельности Галилея. Античные и средневековые предшественники Галилея в оптике. Итальянские предшественники Галилея XVI века. Оптика Леонардо да Винчи. Телескоп Галилея. Микроскоп Галилея. Вопрос о природе света и скорости в оптике Галилея. Наблюдения в области физической оптики.

Цейтлин З. А. Галилей и его борьба за систему Коперника.— «Физика в школе», 1940, № 5, стр. 1—12.

Наиболее примечательные труды Галилея по астрономии — «Звездный вестник», «Весы для золота» (или «Пробирщик золота»), «Диалог о двух важнейших системах», их содержание и значение в истории науки.

Идельсон Н. И. Галилей в истории астрономии.— В кн.: Галилео Галилей. 1564—1642. Сборник, посвященный 300-летней годовщине со дня смерти Галилео Галилея. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 68—141.



РЕНЭ ДЕКАРТ

(1596—1650)

Ренэ Декарт[1] — великий французский философ, математик, физик и физиолог — родился 31 марта 1596 года в местечке Лаэ (провинция Турень во Франции) в дворянской семье. Уже в школьные годы (в коллегии Ла-Флеш в Анжу) у него проявился глубокий интерес к математике. Окончив школу, Декарт вскоре переселился в Париж, где после двух лет шумной светской жизни уединился в Сен-Жерменском предместье и углубился в изучение естественных наук и особенно математики. Декарту было тогда 18 лет. С этого времени он уже никогда не оставлял научных занятий — ни в обстановке военного лагеря в годы службы волонтером в армии, ни во время своих многочисленных путешествий почти по всей Европе.

В 1629 году Декарт поселился в Голландии, где в то время были наиболее благоприятные условия для научной работы. В Голландии он прожил 20 лет, за все это время только два или три раза побывав на родине. Обширная переписка со многими французскими учеными, в особенности с известным математиком и физиком Мерсенном (1588—1648), давала Декарту возможность быть в курсе всех последних достижений науки.

В Голландии Декарт написал свои основные философские, математические и физические сочинения.

Декарт жил и работал в эпоху, когда великие географические открытия привели к бурному развитию торговли, когда внутри замкнутой, феодальной экономики появились первые черты нарождавшихся и прогрессивных тогда буржуазных экономических отношений, определивших и новое направление развития научных знаний. Бесплодные схоластические споры не могли способствовать разрешению новых и новых задач, выдвигавшихся повседневной практикой. Несмотря на яростное сопротивление церкви, наука освобождалась от гнета средневековой схоластики.

---

[1] Латинизированное имя — Картезиус (Renatus Cartesius).



Рене Декарт

Огромный шаг в этом направлении был сделан уже старшим современником Декарта — великим Галилеем.

Декарт глубоко развил высказанную Галилеем мысль о существовании единой первичной материальной субстанции всех вещей и впервые попытался создать полную картину мира, в основе которой лежало представление о движущейся бескачественной материи, т. е. построить механистическую картину мира. Мысль дать общий очерк мироздания возникла у Декарта еще в 1619 году, когда он задумал написать трактат «Мир». К 1633 году это сочинение было в основном закончено. Однако, потрясенный жестокой расправой с Галилеем, Декарт не решился напечатать рукопись и даже хотел ее сжечь.

Углубляя и развивая свои идеи в области физики и математики, Декарт в основу научных исследований положил разработанный им рационалистический метод познания. Важнейшее сочинение Декарта — «Рассуждение о методе», вышедшее в 1637 году в Лейдене анонимно, явилось итогом многолетних размышлений и завершило собою его огромную работу по реформации современной ему науки. Сочинение Декарта о методе (с подзаголовком: «Чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках») было резко направлено против схоластики, против слепой веры в авторитеты. Декарт провозгласил основным средством установления истины, средством познания окружающего мира — логические рассуждения мыслящего человека. Основные положения своего метода он сформулировал в виде знаменитых «четырех правил», в которых попытался привести в систему процесс познания. Рационалистические воззрения Декарта, отрицавшего первостепенное значение опыта в науке, были, конечно, идеалистическими. Но в сочинении Декарта о методе утверждалась вместе с тем сила человеческого разума, провозглашались идеи взаимосвязи и развития явлений. Декарт писал, например, что природа материальных вещей «...гораздо легче познается, когда мы видим их постепенное развитие, чем когда рассматриваем их как вполне уже образовавшиеся»[1]. «Рассуждение о методе» сыграло большую прогрессивную роль в борьбе за научное мировоззрение.

Вместе с этим трудом Декарта, в виде приложений к нему, вышли его работы — «Геометрия», «Диоптрика» и «Метеоры», посвященные математическим и физическим исследованиям.

Декарту принадлежат важнейшие исследования в области алгебры и особенно геометрии. Он впервые ввел метод координат и понятие переменной величины — текущей координаты — и тем самым заложил основы аналитической геометрии. «Поворотным пунктом в математике была декартова переменная величина,— писал Энгельс.—Благодаря этому в математику вошли движение и диалектика и благодаря этому же стало немедленно необходимым дифференциальное и интегральное исчисление, которое тотчас и возникает и которое было в общем и целом завершено, а не изобретено Ньютоном и Лейбницем»[2].

Физическим исследованиям Декарта, кроме двух указанных работ, посвящены его «Начала философии» (1644), «Трактат о свете» (1664),

[1] «Рассуждение о методе». М., Акад. наук СССР, 1953, стр. 42.

[2] Энгельс Ф. Диалектика природы. М., 1955, стр. 206.

а также ряд неоконченных рукописей, в частности, трактат по механике.

В основе физики Декарта лежит идея о том, что в мире не существует ничего, кроме движущейся материи. Все явления природы, все качества тел (цвет, запах, твердость, теплота и т. п.) возникают из механического взаимодействия элементарных материальных частиц. Взаимодействие это Декарт представлял себе в виде давления или удара при соприкосновении частиц друг с другом. Тем самым Декарт впервые провозгласил идею близкодействия.

Декарт развивал высказанную еще Коперником идею относительности движения. Так, если одна частица «а» движется к другой частице «в», то с таким же правом можно считать, что вторая движется к первой. На этом основании Декарт заключил, что состояние движения ничем не отличается от состояния покоя, и впервые попытался сформулировать закон инерции. Впоследствии более полная формулировка этого закона была дана Ньютоном.

Декарту принадлежит первая формулировка и другого важнейшего физического закона — закона сохранения общего количества движения тел при ударе. Согласно Декарту тело при столкновении с другим телом теряет столько собственного движения, сколько сообщает его другому телу.

В целом теория удара Декарта оказалась неправильной. В ней не учитывалась неизвестная тогда возможность перехода энергии движения тела в энергию внутреннего движения частиц другого тела (в теплоту). Декарт еще не различал в достаточной степени четко абсолютно твердые и абсолютно упругие тела, а между тем закономерности явления удара для тех и других существенно различны. Но сама идея сохранения количества движения оказалась чрезвычайно глубокой. Она явилась исходным пунктом исследований, которые привели в дальнейшем к установлению принципа сохранения энергии.

Механическим движением и взаимодействием элементарных частиц различных размеров и формы Декарт пытался объяснить все наблюдаемые физические явления и свойства тел: теплоту, свет, электричество, магнетизм, агрегатные состояния тел, тяжесть, сцепление и т. д.

Декарту принадлежат важные оптические исследования. В трактате «Диоптрика» Декарт опубликовал установленный им независимо от Снеллиуса закон преломления луча света на границе двух сред[1]. В этом же сочинении Декарт уделил большое внимание вопросам применения своих теорий к практике изготовления оптических инструментов. Он сам занимался шлифовкой линз и сконструировал прибор для этой цели. В «Трактате о свете» Декарт предложил механическую теорию распространения света путем мгновенной передачи давления от одной частицы материи к другой.

---

[1] Голландский ученый Снеллиус открыл этот закон около 1620 года, однако не опубликовал своих работ. Открытие Декартом закона преломления относится к 1630 году (опубликовано в 1637 г.).

Считая опыты второстепенным методом познания, он вместе с тем сам провел важное экспериментальное исследование над преломлением и отражением света в стеклянных шарах, наполненных водой, и в результате дал первую правильную теорию радуги.

Физика Декарта приобрела необыкновенно широкую популярность уже среди его современников. В университетах Франции и Англии некоторое время и после смерти Декарта курсы физики читались только по Декарту.

На основе своей физики Декарт создал первую материалистическую космогонию, в которой сделал смелую попытку рассмотреть небесные тела и их системы в развитии. Для XVII века, когда господствовало схоластически-религиозное учение о неизменной Вселенной, эта идея была необычайно новой и смелой.

По Декарту, все небесные тела образовались в результате вихревых движений, имевших место в однородной вначале мировой материи — эфире[1]. Совершенно одинаковые элементарные материальные частицы, находясь в непрерывном движении, меняли свою форму и размеры, что и привело к наблюдаемому нами богатству и разнообразию в природе. Солнечная система, согласно Декарту, представляет собой один из вихрей мировой материи. Центральное светило — Солнце — состоит из более тонкой мировой материи, а планеты и кометы—из более крупных частиц, отброшенных в процессе вращения к периферии. Планеты не имеют собственного движения — они движутся, увлекаемые мировым вихрем. В вихрях, возникающих вокруг планет, частицы давят друг на друга и вызывают явление тяжести (например на Земле).

Исходя из мысли, что в мире нет абсолютно неподвижных точек, Декарт за много десятилетий до обнаружения собственного движения звезд писал в письме к Мерсенну: «Я не сомневаюсь, что и звезды всегда несколько изменяют свое взаимное расположение, хотя их и считают неподвижными».

Декарт неоднократно высказывал материалистическую мысль о естественном развитии природы, утверждая, что сама природа может распутать сложность хаоса. Но, обращаясь к пресловутой «первопричине», он в согласии с господствовавшими взглядами своей эпохи указывал на всесильного бога как творца материи и движения.

Однако, если отбросить традиционный теологический момент в рассуждениях Декарта, то можно с полным основанием сказать, что его система природы — это первая, хотя и неизбежно неполная попытка построить научную, всеохватывающую физическую картину мира. Уже самой постановкой такой задачи он опережал современную ему науку на столетия.

Энгельс высоко оценил Декарта как мыслителя, назвав его наряду со Спинозой блестящим представителем диалектики, жившим в период господства метафизического способа мышления[2].

---

[1] Эфир — среда тонкого строения, заполняющая все пространство. Понятие заимствовано из сочинений древнегреческих ученых. Впервые в качестве научного термина употреблено Декартом, который первый предположил существование определенных механических свойств у эфира.

[2] Энгельс Ф. Анти-Дюринг. М., Госполитиздат, 1953, стр. 20.

Выступив с идеями, противоречившими схоластической науке, а следовательно, и церковным догматам, он вызвал яростную ненависть со стороны церковников, и не только католиков, но и протестантов. По настоятельному требованию главы богословского факультета и ректора Утрехтского университета преподавание философии Декарта в 1642 году было запрещено. Спустя пять лет фактически было запрещено изложение картезианства и в Лейдене.

Декарт пытался вернуться на родину, но обстоятельства не благоприятствовали этому. Воспользовавшись предложением организовать в Стокгольме академию наук, он в 1649 году уехал в Швецию, где через несколько месяцев, 11 февраля 1650 года, умер от воспаления легких.

Преследование Декарта продолжалось и после его смерти. В 1663 году все произведения Декарта были осуждены Ватиканом и внесены в папский «Индекс» запрещенных книг. Вскоре после этого указом Людовика XIV было запрещено преподавание философии Декарта во всех учебных заведениях Франции.

Несмотря на все эти запреты, картезианство быстро распространялось в науке. Смелостью своих идей, величием открывавшихся горизонтов учение Декарта захватило лучшие умы и надолго определило дальнейшее развитие физики и всего естествознания.

Бóльшая часть XVIII века в истории естествознания прошла под знаком борьбы картезианства и ньютонианства. Несмотря на то, что Ньютоново направление на том этапе развития науки было более прогрессивным, общие идеи Декарта продолжали оказывать серьезное влияние на формирование научных взглядов и в XIX веке.

ТРУДЫ ДЕКАРТА

Декарт Р. Избранные произведения. Пер. с франц. и латин. Ред. и вступит. статья В. В. Соколова. М., Госполитиздат, 1950. 712 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Ин-т философии).

В сборник вошли следующие работы Декарта: Правила для руководства ума (пер. В. И. Пикова).—Трактат о свете (пер. А. К. Сынопалова).—Рассуждение о методе (пер. В. В. Соколова).—Метафизические размышления (пер. В. М. Невежиной).—Начала философии (пер. В. Н. Ивановского). —Описание человеческого тела. Трактат об образовании животного (пер. А. К. Сынопалова).—Страсти души (пер. А. К. Сынопалова).—Примечания.

Декарт Р. Рассуждение о методе, с приложениями: Диоптрика, Метеоры, Геометрия. Ред., пер., статьи и коммент. Г. Г. Слюсарева и А. П. Юшкевича. Л., 1953. 656 стр. с илл.; 2 л. портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

В конце книги (стр. 648—649) приводится перечень произведений Декарта на латинском и французском языках (16 назв.).

Декарт Р. Космогония. Два трактата. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934. 326 стр. с портр. (Классики естествознания).

«Трактат о свете», «Описание человеческого тела и трактат об образовании животного».

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЕКАРТА

Энгельс Ф. Анти-Дюринг. Переворот в науке, произведенный господином Евгением Дюрингом. М., Госполитиздат, 1953, стр. 20, 51, 57, 115, 312.

Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955, стр. 60—61, 206, 224—225 и др. (см. именной указатель).

Энгельс характеризует Декарта как блестящего представителя диалектики и неоднократно отмечает его заслуги в утверждении закона сохранения движения. «Количественное постоянство движения, — писал он в «Диалектике природы», — было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь...» (стр. 224—225).

Соколов В. В. Декарт Ренэ.— БСЭ, 2-е изд., т. 13, 1952, стр. 596—600, портр.

Асмус В. Ф. Декарт. М., Госполитиздат, 1956. 371 стр. с илл.; 2 л. портр.

Научная биография Декарта, написанная по первоисточникам. В отдельных главах — о философских и физико-математических трактатах Декарта, о его борьбе за развитие передовых научных и философских идей, о влиянии воззрений Декарта на науку и философию XVII—XIX вв.

Ойзерман Т. И. Философское учение Ренэ Декарта.— В кн.: Декарт Р. Рассуждение о методе... Л., Акад. наук СССР, 1953, стр. 413—457.

Соколов В. В. Философское учение Ренэ Декарта.—В кн.: Декарт Р. Избранные произведения. М., Госполитиздат, 1950, стр. 5—76.

Слюсарев Г. Г. Декарт и оптика XVIII века.— В кн.: Декарт Р. Рассуждение о методе... Л., Акад. наук СССР, 1953, стр. 458—523.

* *
*

Якоби К. Г. О жизни Декарта и его методике направлять ум правильно и изыскивать в науках истину.— «Успехи физ. наук», 1918, т. 1, вып. 3—4, стр. 165—181.

Лекция, прочитанная в 1846 году известным немецким математиком (1804—1851) в связи с 250-летием со дня рождения Декарта. Перевод выполнен акад. А. Н. Крыловым и А. Б. Ферингером. Рекомендуя лекцию вниманию советского читателя, А. Н. Крылов отмечает ее высокие научные достоинства, «удивительное мастерство», с которым Якоби — «один из величайших математиков прошлого века» — сумел рассказать о жизни и творчестве Декарта.

Впервые перевод этой лекции был напечатан в «Отечественных записках», 1846, т. 45, отд. 2, стр. 55—70.

Умов Н. А. Значение Декарта в истории физических наук.— В кн.: Умов Н. А. Собрание сочинений. Т. 3. М., 1916, стр. 98—123.

Речь на торжественном заседании Московского психологического общества в 1896 году по случаю 300-летия со дня рождения Декарта.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 144—150, 167—169, 195—196 и др.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 156—167.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 175—177, 184, 396, 406—407.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 88—102, 113, 122 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 359—560.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 122—126, 243—256, 147—156 и др.

Кузнецов Б. Г. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв. М., Акад. наук СССР, 1955, стр. 84—154 (Картезианская физика).

Исходные идеи картезианского естествознания. Картезианская теория движения. Учение о веществе. Космогония. Эфир. Картезианская философия.

* * *

В 1946 году советская общественность отмечала 350-летие со дня рождения Декарта, а в 1950 году 300-летие со дня его смерти. Этим юбилейным датам посвящены статьи:

350-летие со дня рождения Декарта. (Торжественное собрание во Всесоюзном обществе культурной связи с заграницей — ВОКС'е).— «Вестник Акад. наук СССР», 1946, № 5—6, стр. 99—101.

На заседании выступили: акад. С. И. Вавилов (значение идей Декарта для дальнейшего развития науки), акад. Е. В. Тарле (характеристика эпохи Декарта), С. Л. Рубинштейн (роль Декарта в истории философии).

300-летие со дня смерти Ренэ Декарта.—«Вестник Акад. наук СССР», 1950, № 5, стр. 63—67.

Сообщение о совместном заседании Отделения истории и философии и Отделения физико-математических наук Академии наук СССР. В статье приводится краткое изложение вступительного слова акад. И. Г. Петровского и докладов: Б. Н. Делоне «Аналитическая геометрия Р. Декарта и ее влияние на дальнейшее развитие математики», М. А. Дынника «Философия Р. Декарта» и Б. Г. Кузнецова «О естественнонаучных идеях Декарта».

ЭВАНДЖЕЛИСТА ТОРРИЧЕЛЛИ

(1608—1647)

Торричелли был наиболее выдающимся учеником и прямым преемником Галилея. Он родился в итальянском городке Фаэнца 15 октября 1608 года. Оставшись сиротой, Торричелли был воспитан своим дядей — ученым монахом — и уже в ранние годы проявил живой интерес к наукам. Восемнадцати лет он был уже в Риме и учился у известного в те времена математика Бенедетто Кастелли (1577—1644), друга и ученика Галилея.

Торричелли занимался математикой и механикой, конструировал весьма совершенные по тому времени микроскопы, шлифовал телескопические линзы.

В 1641 году он опубликовал свое единственное крупное сочинение— трактат «О движении тяжелых тел», приведший в восхищение Галилея. Это явилось поводом для встречи в том же году молодого Торричелли с гениальным ученым, в то время уже слепым стариком, доживавшим под надзором инквизиции в местечке Арчетри последние месяцы своей большой и бурной жизни. Вместе с двумя другими учениками Галилея— Кастелли и Вивиани — Торричелли проводил в последний путь великого мыслителя. После смерти Галилея Торричелли переехал во Флоренцию и был назначен придворным математиком герцога. Здесь он и умер в 1647 году.

В своем трактате Торричелли выступил с защитой галилеевских законов свободного падения тел, против сторонников традиционных взглядов Аристотеля. Он подтвердил и развил теорию Галилея о параболической форме траекторий полета пушечных ядер.

В этом же сочинении Торричелли сформулировал закон истечения жидкостей из отверстий сосуда. Рассматривая падение жидкости в сосуде как явление, аналогичное падению тела, он в соответствии с динамикой Галилея, доказал, что скорость истечения жидкости из отверстия в сосуде прямо пропорциональна квадратному корню из высоты уровня жидкости, а не самой высоте, как считали прежде (Кастелли), и что



Эванджелиста Торричелли

форма вытекающей струи — параболическая. На том же основании Торричелли сделал вывод, что в сообщающихся сосудах струя жидкости, бьющая из более короткого сосуда, должна, при отсутствии внешних сопротивлений, достигать высоты уровня жидкости в более высоком. Этими открытиями были заложены основы гидродинамики.

Но подлинную славу принесло Торричелли открытие атмосферного давления. Знаменитый «опыт с ртутью», или «итальянский опыт», как его позже называли, впервые был, по просьбе Торричелли, проделан в 1643 году Винченцо Вивиани. Этот опыт, на первый взгляд лишь подтверждал мысль Галилея об ограниченности силы, которую называли «боязнью пустоты».

Еще со времен Аристотеля существовало мнение, что «природа боится пустоты», чем и объясняли, например, подъем жидкостей в узких сосудах, подъем воды под поршнем водяного насоса и т. п. Это был лженаучный взгляд, порожденный стремлением древних ученых одухотворять природу, наделяя ее человеческими чертами. Уже Галилей обратил внимание на то, что в водяном насосе вода поднимается лишь до высоты немногим более 10 *м* и далее не следует за поршнем, хотя под ним и остается пустое пространство. В опыте Торричелли ртуть, вначале заполнявшая длинную, запаянную с одного конца стеклянную трубку, при переворачивании трубки и опускании ее открытым концом в чашку с ртутью не выливалась до конца: в трубке оставался столбик ртути высотою примерно в 76 *см*, а над ним оставалась пустота, получившая впоследствии название «торричеллиевой».

Вскоре, однако, Торричелли заметил колебания уровня ртути в трубке и сделал замечательный вывод, что изобретенный им прибор может служить не только для получения пустоты, но что он показывает «изменения воздуха, то более тяжелого и грубого, то более легкого и тонкого». Так было открыто атмосферное давление.

С опытом Торричелли широкие научные круги Европы познакомились через сочинение Валериана Магни, который в 1647 году повторил этот опыт и пытался приписать его себе.

Однако окончательно освоились с мыслью о давлении атмосферного воздуха лишь после того, как была высказана (Декарт, Мерсенн, Паскаль) и опытным путем подтверждена (Паскаль) идея об уменьшении высоты столба ртути с повышением места наблюдения.

Не менее ярким подтверждением существования атмосферного давления явился знаменитый опыт Отто Герике (1602—1686) с магдебургскими полушариями, когда 16 лошадей не могли разъединить два полушария диаметром около 40 *см*, из которых был выкачан воздух. Атмосферное давление стало, таким образом, буквально очевидным.

Открытие и последующие неоднократные доказательства атмосферного давления окончательно опровергли теорию «боязни пустоты».

Прибор Торричелли (ртутный барометр), при помощи которого впервые было установлено атмосферное давление, в настоящее время является важнейшим прибором в метеорологии.

Следует заметить, что к факту получения пустоты в своем опыте Торричелли отнесся равнодушно, хотя это было не менее великим от-

крытием. Оно опрокидывало державшиеся свыше двух тысячелетий представления о принципиальной невозможности получить пустоту. После Торричелли «пустота» сделалась объектом исследования прежде всего для флорентинских академиков, которые получали ее по методу Торричелли. Однако научное применение вакуума началось только после изобретения Герике воздушного насоса.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Э. ТОРРИЧЕЛЛИ

Торричелли Эванджелиста (1608—1647). — БСЭ, 2-е изд., т. 43, 1956, стр. 44.

Хргиан А. Знаменательные даты 1947 г. — «Метеорология и гидрология», 1947, № 4, стр. 85.

К 300-летию со дня смерти Торричелли. Краткий биографический очерк.

Шишаков Н. А. К истории барометра. — «Физика в школе», 1939, № 3, стр. 18—21, илл.

Описание исторических опытов Торричелли и Паскаля.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 180—181.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 194.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 233—237.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 85—87.

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 201—204.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 160—162, 165.

Ольшки Л. История научной литературы на новых языках. Т. 3, Галилей и его время. Пер. с нем. А. Ф. Коган-Бернштейн и П. С. Юшкевича. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 217, 220, 265, 270 и др. (см. именной указатель) .

Во всех трудах по истории науки основные факты, связанные с открытием Торричелли, изложены в целом одинаково, но в каждом из них читатель найдет и что-нибудь новое. Вот почему можно рекомендовать ознакомиться со всеми этими трудами.

БЛЕЗ ПАСКАЛЬ

(1623—1662)

В середине XVII века ярким метеором сверкнул гений Паскаля, ставшего жертвой религиозного мистицизма и в 30 лет угасшего для науки. Короткий творческий путь Паскаля обогатил многие разделы физики и математики. В 16 лет он написал трактат «Опыт теории конических сечений», в котором, развивая идеи друга своего отца, математика Ж. Дезарга, доказал одну из важнейших теорем проективной геометрии. Исследования эти были продолжены лишь в XIX веке. В переписке с великим математиком XVII века Пьером Ферма́ и в «Трактате об арифметическом треугольнике» Паскаль высказал ряд основных положений вскоре после того возникшей теории вероятностей. Он создал основополагающие работы по теории чисел. В исчислении бесконечно малых Паскаль существенно развил и углубил исследования знаменитого итальянского математика XVII века Кавальери и оказал немалое влияние в дальнейшем на работы Лейбница по дифференциальному и интегральному исчислению. Девятнадцати лет Паскаль изобрел и сконструировал счетную машину (для четырех арифметических действий).

За короткие шесть лет, отданных им физике, Паскаль установил важнейший закон гидростатики, продолжил и развил исследования Торричелли, связанные с открытием атмосферного давления.

Блез Паскаль родился 19 июня 1623 года в небольшом французском городе Клермон-Ферране, где его отец, Этьен Паскаль, был президентом податной палаты. В 1631 году Паскаль с отцом переехал в Париж.

Проявлению незаурядных способностей Паскаля способствовала атмосфера научных интересов в семье. В доме отца — известного математика-любителя, одного из организаторов парижского кружка ученых, из которого впоследствии возникла Парижская академия наук, собирались видные математики и физики, в том числе М. Мерсенн (1588—1648), сыгравший большую роль в творческом общении между многими известными учеными того времени. Паскаль рано заинтересовался физикой. С детства он отличался исключительной наблюдательностью и



Блез Паскаль

необычайной способностью к самостоятельным выводам. Уже в 10 лет Паскаль попытался изложить свои первые наблюдения звука, заинтересовавшись явлением прекращения звука при малейшем прикосновении к звенящему стакану.

В 1647 году Паскаль начал свои исследования по физике. Узнав через Мерсенна об опыте Торричелли, он повторил этот опыт с ртутью, водой и красным вином, исходя вначале из общепринятой теории «боязни пустоты», так как само описание прибора и опыта Торричелли в то время еще не дошло до Паскаля.

Познакомившись с вышедшим вскоре трудом Торричелли, где утверждалось существование атмосферного давления, чем и объяснялся результат опыта, Паскаль нашел это объяснение более правдоподобным и начал усиленные поиски дополнительных доказательств открытия Торричелли. В опыте Торричелли Паскаль попытался прежде всего удалить насколько мог воздух над открытым резервуаром со ртутью. Происшедшее при этом падение уровня ртути в запаянной трубке показало со всей очевидностью зависимость высоты столба ртути в трубке от давления воздуха. Окончательным же доказательством справедливости открытия Торричелли явился опыт Паскаля, установивший зависимость высоты ртутного столба от высоты местности. Опыт был проделан, по поручению Паскаля, 19 сентября 1648 года его родственником Перье на горе Пюи-де-Дом (высотой 4 300 фр. футов, или 1,4 *км*). Еще в 1647 году Паскаль писал Перье: «...если бы высота ртути на вершине горы оказалась меньшей, чем у подошвы (я так думаю по многим основаниям, хотя все писавшие об этом предмете придерживаются другого мнения), то из этого можно было бы заключить, что единственная причина явления — тяжесть воздуха, а не пресловутый «horror vacui» [боязнь пустоты]. Ясно, в самом деле, что внизу горы воздух должен быть сгущеннее, чем наверху, между тем как нелепо предполагать в нем больший страх пустоты у подножия, нежели на вершине».

Результаты опыта блестяще оправдали предположения Паскаля. Разница высот ртутного столба оказалась весьма заметной — 3 дюйма и 15 линий (около 8 *см*). Эти результаты Паскаль опубликовал в «Изложении опыта о равновесии жидкостей» (1648). Такой же опыт Паскаль провел лично в Париже на башне Св. Жака высотой в 150 футов (около 50 *м*) и также заметил изменение высоты столба ртути. Теория «боязни пустоты» была опровергнута. Занимаясь этими исследованиями, Паскаль первый пришел к выводу, что барометр может служить для измерения высоты местности, вернее разности высот двух пунктов. Однако он подчеркивал сложность этой проблемы, так как, вопреки общепринятому мнению, не считал плотность воздуха всюду одинаковой, отметив в вышеприведенном письме, что она уменьшается с высотой. Паскаль заметил, кроме того, колебания высоты ртутного столба в связи с изменениями погоды, и его заключение о том, что большую роль в этом играют изменения ветров, влажности и температуры, было гораздо более правильным, чем многие более поздние объяснения.

Все свои исследования по атмосферному давлению Паскаль из-

ложил в «Трактате о тяжести воздуха» (1653), который увидел свет лишь в 1663 году. В этом сочинении Паскаль объяснял атмосферным давлением явление просасывания, а также многие случаи прилипания.

Исследования атмосферного давления привели Паскаля к замечательным открытиям в области гидростатики, которые он изложил в «Трактате о равновесии жидкостей» (1653 г., опубликован в 1663 г.). Основной закон гидростатики — закон Паскаля — гласит: давление на поверхность жидкости, произведенное внешними силами, передается жидкостью одинаково во всех направлениях.

Этот закон имеет огромное значение для техники. Он позволяет малыми усилиями преодолевать значительно большие сопротивления, что используется в гидравлическом прессе.

Формулировка принципа действия гидравлического пресса также принадлежит Паскалю.

Как и большинство ученых того времени, Паскаль был религиозен, однако он резко отграничивал опирающуюся на авторитет догматическую религию от непрерывно идущей вперед науки. В прогрессе науки Паскаль видел цель существования человечества. Настоящей трагедией для науки была потеря этого блестящего ума, когда в расцвете творческих сил, после большого потрясения, пережитого им во время путешествия в 1653 году (он едва не погиб), Паскаль навсегда порвал с наукой, поддавшись религиозно-мистическим настроениям. В 1655 году он поселился в монастыре янсенистов в Пор-Рояле, который был тогда центром оппозиции абсолютизму и католической церкви. В 1656 году в знаменитых «Письмах провинциалу», осужденных католической церковью, но тем не менее выдержавших 60 изданий, Паскаль зло высмеивал казуистику и лицемерие иезуитов. Однако как ученый он больше не выступал. Последние девять лет жизни Паскаль посвятил теологическим размышлениям.

Умер Паскаль в 1662 году 39 лет от роду.

ТРУДЫ Б. ПАСКАЛЯ

Паскаль Б. Трактаты о равновесии жидкостей и весе массы воздуха, содержащие объяснение причин различных явлений природы, которые до сих пор не были достаточно известны, и, в частности, тех, которые приписывались боязни пустоты. — В кн.: Начала гидростатики. Архимед. Стэвин. Галилей. Паскаль. Пер., примеч. и вступит. статья А. Н. Долгова. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 363—401.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Б. ПАСКАЛЯ

Паскаль Блез (1623—1662).— БСЭ, 2-е изд., т. 32, 1955, стр. 195—196, портр.

Зонненштраль А. Блез Паскаль. (К 275-летию со дня смерти). — «Знание — сила», 1937, № 8, стр. 20—23, илл.

Краткий очерк жизни и деятельности.

Шишаков Н. А. К истории барометра. — «Физика в школе», 1939, № 3, стр. 18—21, илл.

Описание исторических опытов Торричелли и Паскаля.

Рейдемейстер К. Трагедия Блеза Паскаля. — «Знание — сила», 1954, № 12, стр. 17—19, илл.

Научное творчество Паскаля. Борьба между знанием и верой — один из основных конфликтов эпохи и его отражение в жизненной судьбе Паскаля.

* *
*

Филиппов М. П. Паскаль. Его жизнь и научно-философская деятельность. Биографический очерк. Спб., 1891. 78 стр.; 1 л. портр. (Жизнь замечат. людей. Биогр. б-ка Ф. Павленкова).

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 181—183.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 194.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 237—242.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 112—114.

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 565—575.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 162—165 и др. (по именному указателю).

Долгов Н. А. Краткий очерк истории гидростатики. — В кн.: Начала гидростатики. Архимед. Стэвин. Галилей. Паскаль. Пер., примеч. и вступит. статья А. Н. Долгова. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 13—88.

Вкладу Паскаля в разработку основных начал гидростатики посвящены в этом очерке стр. 80—88.



РОБЕРТ БОЙЛЬ

(1627—1691)

Знаменитый английский ученый Роберт Бойль вошел в историю мировой науки как один из основоположников опытного естествознания в XVII веке, один из создателей атомистического учения и — на этой основе — прогрессивного тогда механистического направления в физике и химии.

Роберт Бойль родился 25 января 1627 года в Ирландии (в Лисморе) в богатой семье, что обеспечило ему в дальнейшем возможность вести научные исследования, не занимая какой-либо официальной должности в университете. До 12 лет Бойль учился в колледже в г. Итоне, а затем для завершения образования ездил в Швейцарию, Италию и Францию.

После возвращения на родину Бойль некоторое время занимался философией и вопросами религии, но затем, переселившись в 1654 году в Оксфорд, начал исследования по физике и химии, которые с этого времени становятся основным делом всей его жизни.

Во времена Бойля научные сведения об окружающем мире, полученные путем наблюдений, были крайне скудны и отрывочны. Еще сильна была схоластика, сводившая изучение явлений природы исключительно к их толкованию в духе суждений античных авторов и прежде всего Аристотеля. В области физики господствовало учение о «скрытых», «абсолютных», непознаваемых качествах тел. Химия вовсе не существовала как самостоятельная наука. Она сводилась к искусству изготовлять лекарства. Чрезвычайное распространение получила алхимия, представители которой занимались поисками мистического философского камня, способного якобы превращать металлы в золото. «Теоретической» основой для химиков еще служило учение Аристотеля о четырех первичных элементах всякого тела (земля, вода, огонь, воздух) или выработавшееся у практиков, но столь же искусственное учение о трех началах (сера, ртуть, соль).

В XVII веке, в связи с начавшимся развитием буржуазного производства, в Англии уже шла борьба против схоластики за опытное естествознание. Но многие представители этого нового направления часто впадали в другую крайность, вовсе отрицая возможность каких бы то ни было теоретических обобщений.

С самого начала своей научной деятельности Бойль решительно выступил против схоластики. При его непосредственном участии в Оксфорде было создано научное общество, так называемая «невидимая коллегия», лозунгом которой были слова «Nullius in verba» (ничего со слов). В 1662 году оно оформилось в Королевское общество, которое с 1668 года, после перевода его в Лондон, стало называться Лондонским королевским обществом и под этим именем получило широкую известность как одна из ведущих академий мира.

В 1668 году Бойль также переселился в Лондон. С 1680 года и до конца своей жизни он занимал пост президента Лондонского королевского общества.

Научную деятельность в области физики Бойль начал с исследования упругих свойств воздуха. Вместе со своим помощником Робертом Гуком (см. стр. 73—75) он усовершенствовал (1660) изобретенный незадолго до этого Отто Герике (1602—1686) воздушный насос и в опытах с этим прибором открыл множество новых физических фактов. Бойль впервые отметил, что теплая вода закипает при разрежении окружающего ее воздуха; что явление капиллярности — самопроизвольный подъем жидкостей по тонким трубкам — не связано с атмосферным давлением, так как наблюдается и под колоколом воздушного насоса; что сифон, напротив, перестает действовать при достаточном разрежении воздуха и т. д.

В 1662 году Бойль вместе со своим учеником Р. Тоунлеем открыл один из основных законов для газов — закон обратной пропорциональности между давлением (упругостью) воздуха и объемом, который воздух занимает, при условии, что температура его постоянна. Этот закон был найден в результате опытов с ртутным барометром. Бойль стремился еще раз подтвердить, что именно давление воздуха удерживает столб ртути в барометре. Несмотря на опыты Торричелли, еще далеко не все физики во времена Бойля были убеждены в том, что легкий, крайне подвижный воздух может на что-то давить. Для своих опытов Бойль сконструировал барометр в виде неравноколенного сифона, короткое колено которого было запаяно. Наливая ртуть в длинное колено, Бойль наглядно показал, что воздух, оставшийся в запаянном колене над ртутью удерживал благодаря своей упругости, столб ртути в длинном колене. Чем меньший объем занимал воздух в малом колене барометра, тем более высокий столб ртути мог он удержать, т. е. тем большее давление производил он на ртуть. Этот закон, опубликованный Бойлем в 1662 году в работе «Защита учения, касающегося упругости и веса воздуха» и через 14 лет вновь установленный на основании более обширного экспериментального материала французским физиком



Роберт Бойль

Мариоттом (1620—1684), получил название закона Бойля—Мариотта и является основным уравнением состояния для идеального газа, а при небольших давлениях — и для газов реальных.

Кроме исследований упругости воздуха, Бойлю принадлежат важные экспериментальные работы в других областях физики.

В области оптики Бойль высказал мысль, что все цвета являются видоизменением белого цвета. Это была одна из наиболее ранних догадок о сложной природе белого луча света.

Изучая условия электризации тел, он впервые подметил возможность электризации на расстоянии, через влияние. Само это явление было изучено лишь много лет спустя после смерти Бойля (Рихман, Эпинус и др.). Бойль показал на опыте, что электрические свойства янтаря полностью сохраняются и при отсутствии воздуха, т. е. что электрическая сила, вопреки существовавшему ранее мнению, связана только с самим янтарем. Электрические свойства тел Бойль в согласии с господствовавшей со времени Гильберта точкой зрения объяснял наличием в теле электрической жидкости.

Более 10 лет посвятил Бойль исследованиям хемилюминесценции — явления свечения при химических реакциях. Бойль исследовал частный случай этого явления — свечение некоторых живых организмов (в гнилом дереве, мясе и т. д.). Он правильно подметил основное сходство между свечением при горении (угля) и биолюминесценцией — необходимость воздуха, причем «холодное свечение», как отмечал Бойль, в отличие от горения может неограниченно долго происходить в плотно закрытом сосуде (действительно, хемилюминесценция — свечение при медленном окислении некоторых веществ, тогда как горение — реакция интенсивного окисления вещества).

Бойль занимался также экспериментальными исследованиями в области гидростатики, акустики, изучал явление теплоты.

В области физических теорий Бойль выступил сторонником и продолжателем французского физика-атомиста Пьера Гассенди (1592 — 1655). Бойль утверждал, что все тела состоят из мельчайших и совершенно одинаковых частиц. Все многообразие веществ он объяснял различием в количестве, расположении и поведении первичных частиц в теле. Так, неподвижные частицы составляют, по Бойлю, твердые тела, тогда как подвижные — жидкости. Все явления в природе — тепловые, электрические, магнитные и др. — Бойль стремился объяснить механическими движениями тел и их частиц. Это механистическое направление в естествознании, появившееся в основном под влиянием физики Декарта, стремление объяснить явления природы на основе доступных изучению свойств тел противопоставлялось схоластическим учениям о «скрытых» качествах тел и было в XVII веке прогрессивным направлением.

Так, определяя пути развития механической теории тепла, Энгельс в «Диалектике природы» писал: «...уже Бэкон говорил (а после него

Бойль, Ньютон и почти все англичане), что теплота есть движение (Бойль уже, что — молекулярное движение)»[1].

Огромная роль принадлежит Бойлю в развитии, более того — в создании химии. Бойль выступил против алхимии и схоластических учений о четырех или трех первичных элементах. Он распространил на химию атомистические представления и впервые дал четкое определение самого предмета исследования в этой науке — химического элемента как предела разложения вещества на составные части (1661). В ходе обширных экспериментальных исследований Бойль открыл ряд важных химических реакций и положил начало качественному химическому анализу. Он же впервые высказал мысль о необходимости проверки результатов химического анализа путем химического синтеза, т. е. соединения выделенных в результате анализа составных частей, чтобы получить первоначальное исследуемое тело. Не ограничиваясь чисто качественными опытами, Бойль один из первых стал применять в химических исследованиях весы. Он много экспериментировал над сжиганием веществ, однако еще не представлял себе роли воздуха в этом явлении. В частности, он пришел к ошибочному выводу, что вес запаянного сосуда при сжигании в нем какого-либо вещества изменяется. Эту ошибку впервые (1756) выявил М. В. Ломоносов, а затем Лавуазье (1770).

Результаты химических исследований Бойль изложил в своем знаменитом сочинении «The sceptical chymist» («Химик-скептик», Оксфорд, 1661), которое он назвал так потому, что выразил в нем свое скептическое отношение как к схоластам, так и к «чистым» эмпирикам, отвергавшим возможность каких-либо обобщающих выводов из опытов.

На протяжении всей своей научной деятельности Бойль выступал не только как ученый-естествоиспытатель, но и как философ. Такие философские высказывания его, как, например, утверждение о существовании у тел первичных (объективных) и вторичных (субъективных, воспринимаемых органами чувств и, следовательно, относительных) качеств, были явно направлены против схоластических учений о «скрытых», «абсолютных» качествах. Вместе с тем Бойль в своей философии, следуя духу века, стремился примирить науку с религией. В частности, он пытался отделить свою атомистику от атомистики античной, материалистической.

Бойль умер 30 декабря 1691 года в Лондоне и был похоронен в Вестминстерском аббатстве.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ РОБЕРТА БОЙЛЯ

Бойль Роберт (1627—1691). — БСЭ, 2-е изд., т. 5, 1950, стр. 383—384, портр.

Радовский М. И. Опыты Бойля и Ньютона по электричеству. — «Вестник знаний», 1939, № 1, стр. 72—74.

---

[1] Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955, стр. 224.

Статья знакомит с работами Бойля, как они описаны в его сочинении «Опыты и заметки о механическом происхождении и получении электричества».

Свешников Б. Н. «Чудесное вещество» Роберта Бойля. — «Наука и техника», 1939, № 21—22, стр. 18—19.

Несколько любопытных фактов из истории исследований светящихся тел (биолюминесценции) и опытов Бойля по изучению фосфоресценции.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юнош. лит., 1937, стр. 159—170.

Глава: Роберт Бойль (1627—1691).

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 185—187.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 194—197.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 134—139.

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 307—310.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 174—176, 185—186 и др. (см. именной указатель).

ХРИСТИАН ГЮЙГЕНС

(1629—1695)

Великий голландский механик и физик Христиан Гюйгенс жил и работал в то время, когда в его стране у власти встал молодой и прогрессивный тогда класс буржуазии, интересы которого настойчиво требовали решения важных технических проблем на основе новых научных теорий. Это требование эпохи нашло особенно яркое выражение в трудах Гюйгенса, который вошел в историю науки как изобретатель маятниковых часов, искусный конструктор астрономических инструментов и в то же время как творец волновой теории света и как создатель первой научной теории маятника, в которой был впервые сформулирован по существу закон сохранения механической энергии.

«Редким гением» назвал Гюйгенса Лаплас в своей «Системе мира». Две крупнейшие академии пригласили его для работы — Лондонское королевское общество в 1663 году и Парижская академия наук при своем основании в 1665 году.

Исследования Гюйгенса затрагивали почти все разделы современной ему физики, но в основном его деятельность протекала в области механики и оптики, что в свою очередь было тесно связано с его математическими и астрономическими занятиями.

Гюйгенс родился 14 апреля 1629 года в Гааге. Он получил юридическое образование в Лейденском университете и в юридической школе г. Бреда. В 26 лет Гюйгенс имел уже степень доктора прав. Однако призвание к физико-математическим наукам, проявлявшееся у него еще в ранней юности, одержало верх. Этому способствовала обстановка в семье: отец Гюйгенса был широко образованным человеком, лично знавшим Декарта и многих других ученых того времени.

Уже в Лейдене и Бреде Христиан Гюйгенс под влиянием математических сочинений Архимеда углубленно изучает математику; с другой стороны, его захватывает грандиозность перспектив науки, открытых перед физиками Декартом.

Первые научные работы Гюйгенса появились в начале 50-х годов

XVII века и были посвящены наиболее актуальным в то время проблемам математики — методам нахождения площадей различных кривых (или квадратуре кривых). Гюйгенсу принадлежит также одно из первых исследований по теории вероятности, в котором он развивал идеи Паскаля и Ферма. Узнав из переписки с Лейбницем о дифференциальном исчислении, Гюйгенс сразу сумел оценить все колоссальное значение этого метода и применил его в своих работах. К математическим исследованиям он возвращался и в дальнейшем в связи с работами по механике.

В эти же годы Гюйгенс усиленно занимался астрономической оптикой. Достигнув высокого мастерства в изготовлении светосильных объективов, он при помощи своих телескопов-рефракторов сделал ряд важных астрономических открытий. Ему принадлежит открытие шестого спутника Сатурна (Титан) и весьма точное определение периода его обращения; открытие туманности в созвездии Ориона; полярных шапок на Марсе и полос на Юпитере; наконец, наиболее замечательное из всех этих открытий — открытие кольца Сатурна, которое до Гюйгенса наблюдали (впервые Галилей) лишь в виде загадочных выступов по бокам планеты. В сочинении «Система Сатурна» (1659) Гюйгенс подчеркивал, что его астрономические открытия служат подтверждением «той изумительной системы, которую называют именем Коперника». Гюйгенсу принадлежит изобретение первого прибора для измерения яркости звезд, с помощью которого он пытался определить расстояние до них.

С астрономическими проблемами тесно связаны работы Гюйгенса по точной механике. Во времена Гюйгенса одной из наиболее острых проблем в наблюдательной астрономии была проблема точного счета времени. Без этого невозможны были точные исследования движений небесных тел. Гиревые часы, существовавшие еще с XIV века, отличались крайне низкой точностью, так как падение гирь в них было весьма неравномерным. Маятники, применявшиеся многими физиками для счета времени (после открытия Галилеем их законов), не имели счетчика колебаний и вскоре после пуска останавливались из-за трения. Над созданием часов трудились многие выдающиеся механики. Близко к решению этой проблемы подошел в конце своей жизни Галилей.

Поставленная задача была блестяще решена двадцативосьмилетним Гюйгенсом. В 1657 году он получил патент на изобретенные им маятниковые часы, в которых падение гирь было равномерным и колебания маятника не затухали в течение длительного времени благодаря изобретенному Гюйгенсом приспособлению («спуску»), поддерживавшему равномерные колебания. Небольшая по объему работа «Horologium» («Маятниковые часы», 1658), в которой Гюйгенс впервые описал свое изобретение, составила эпоху в развитии механики. Карл Маркс писал об этом изобретении: «Часы являются первым автоматом, созданным для практических целей; на них развивалась вся теория о производстве *равномерных движений*» [1].

---

[1] Маркс К. и Энгельс Ф. Сочинения. Т. XXIII. М., 1930, стр. 131.



Христиан Гюйгенс

После избрания в члены Парижской академии наук Гюйгенс в 1666 году уехал во Францию и прожил там 15 лет.

В Париже в 1673 году вышло второе сочинение Гюйгенса о маятниковых часах («Horologium oscillatorium»), представляющее собою результат дальнейших исследований его в этом направлении. Работа 1658 года вошла в него как одна из глав.

Трактат Гюйгенса 1673 года — одна из самых замечательных в XVII веке книг по механике. В нем Гюйгенс впервые в истории науки дал полную теорию маятника.

До работ Гюйгенса были известны лишь законы качания математического маятника с бесконечно малой амплитудой (законы Галилея). В частности, была известна изохронность (независимость периода от амплитуды) таких качаний. Гюйгенс впервые изучил законы качания математического маятника при больших амплитудах и вывел формулу для определения периода колебаний маятника по его длине. В дальнейшем, изучая свойства сложных кривых, Гюйгенс предложил использовать в часах особый маятник, движения которого совершались бы не по дуге окружности, а по циклоиде, и потому, как это доказал Гюйгенс, были бы также изохронны при любых амплитудах.

Выдающимся достижением Гюйгенса в этой области являются его исследования гораздо более сложного явления — колебаний физического маятника, т. е. колебаний любого тела около любой его точки. В 1646 году известный французский физик и математик Мерсенн (1588—1648) предложил задачу — найти центр колебаний физического маятника. Эту задачу в то время безуспешно пытались решить Декарт, Ж. Роберваль (1602—1675) и — тогда семнадцатилетний—Гюйгенс. Гюйгенс не оставил своих исследований, и через 27 лет, в 1673 году, задача о нахождении центра колебаний физического маятника была им полностью решена.

Исключительно большой заслугой Гюйгенса является и то, что при решении этой задачи он первый применил сформулированный им принцип (по существу эквивалентный принципу сохранения живых сил, или механической энергии): «Если несколько тяжелых тел приведены в движение силой тяжести, то они не могут двигаться так, чтобы их центр тяжести поднимался выше того места, с которого он стал опускаться».

В том же сочинении 1673 года о маятниковых часах Гюйгенс исследовал вопрос о круговом движении и о центробежной силе, вызывающей натяжение нити маятника. Развивая введенное Галилеем понятие *ускорения*, Гюйгенс распространил его на круговое движение и ввел понятие *центростремительного ускорения*. Он вывел также формулу центробежной силы для кругового движения. Подробнее об этом Гюйгенс писал в трактате «De motu et vi centrifuga» (О движении и центробежной силе), вышедшем уже после его смерти.

Гюйгенс создал теорию центробежного маятника, нашедшего широкое применение в качестве терморегулятора в паровых машинах.

В 1674 году по указаниям Гюйгенса были устроены первые пружинные карманные часы, которые он рекомендовал для употребления на море при определении географической долготы.

В области механики большой заслугой Гюйгенса является также создание им первой полной теории удара упругих шаров, в которой он исходил из принципа сохранения количества движения.

На основе точной механики Гюйгенс произвел в 1680 году расчет планетной машины, которая должна была с помощью зубчатых передач воспроизводить движение небесных тел солнечной системы. Это была последняя работа Гюйгенса в Париже.

В связи с возобновившимися во Франции религиозными притеснениями протестант Гюйгенс был вынужден в 1681 году уехать из Парижа на родину.

В Голландии Гюйгенс возвращается к занятиям оптикой. В период 1681—1687 гг. он конструирует «воздушные» астрономические трубы с длиннофокусными (для уменьшения хроматической аберрации) объективами (до 63 *м*). Объектив и окуляр таких телескопов монтировались на высоких платформах и не имели общей оправы: отсюда название «воздушная труба». В эти годы Гюйгенс изобрел окуляр, названный впоследствии его именем и применяемый в астрономии и в настоящее время.

Еще в 1678 году Гюйгенс представил Парижской академии наук мемуар, в котором изложил свою теорию света. Однако в связи с возвращением в Голландию печатание мемуара затянулось, и он был издан лишь в 1690 году в Лейдене под названием «Трактат о свете».

Туманные догадки о волновой природе света высказывал уже итальянский физик и астроном Гримальди (1618—1663). Более решительно утверждал это Роберт Гук (1635—1703), представлявший себе свет в виде очень быстрых, чрезвычайно малой амплитуды колебаний среды.

Гюйгенс в своей теории пошел по иному пути. Проводя аналогию между явлениями света и звука, он рассматривал свет как распространяющиеся в эфире (см. очерк о Декарте) упругие импульсы — возмущения. Гюйгенс называл их волнами, но при этом не считал распространение света периодическим процессом и даже специально подчеркивал: «Не нужно представлять себе, что эти волны следуют друг за другом на одинаковых расстояниях». В его теории не было понятия длины волны.

Однако значение «волновой гипотезы» Гюйгенса не в этих представлениях, еще весьма далеких от представлений о волновом, периодическом процессе. Его заслуга заключается в том, что он впервые предложил общий принцип, который позволял теоретически определять направление светового луча. Сущность этого принципа, получившего название «принципа Гюйгенса»[1], заключается в утверждении, что *любая точка, до которой дошло волновое возбуждение, является центром вторичных элементарных сферических волн.* Поверхность, огибающая вторичные волны, если во всех ее точках фаза волнового возбуждения одна и та же, представляет собою, по Гюйгенсу, волновую поверхность (фронт волны). При этом «обратные» элементарные волны, направленные к источнику, не принимаются во внимание как не имеющие физического смысла.

[1] В дальнейшем этот принцип был дополнен и расширен Френелем и в настоящее время известен как «принцип Гюйгенса — Френеля» (см. очерк о Френеле).

Опираясь на этот принцип, Гюйгенс объяснил все известные тогда явления геометрической оптики — отражение, преломление и сложнейшее явление двойного лучепреломления в кристалле исландского шпата, открытое в 1669 году профессором Копенгагенского университета Эразмом Бартолинусом. Гюйгенс объяснил ход «необыкновенного» луча и нашел способ определять его направление для любых углов падения первоначального луча света. Это последнее открытие и вызвало у Лапласа слова восхищения «редким гением» Гюйгенса.

Однако теория света Гюйгенса не была принята современниками. На рубеже XVII—XVIII вв. появились знаменитые оптические труды Ньютона, в которых предпочтение отдавалось корпускулярной гипотезе света. Осторожные высказывания Ньютона о корпускулярной теории света «ньютонианцы» приняли за догму и отбросили теорию Гюйгенса без обсуждения. Даже великий Эйлер — ревностный защитник волновой теории — не смог пробить стену молчания, которой был окружен «Трактат о свете». Только в XIX веке, когда на основе волновой теории света были объяснены явления интерференции (Юнг, 1801) и дифракции (Френель, 1818), когда известный английский математик У.-Р. Гамильтон (1805—1865), опираясь на открытия Френеля, предсказал тонкий эффект конической рефракции (1832), а Леон Фуко обнаружил в 1852 году, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе (это противоречило корпускулярной теории),— волновая теория света получила, наконец, широкое признание.

Гюйгенс оставил заметный след и в других областях физики. Он сконструировал высокочувствительный (так называемый «двойной») барометр. Ему совместно с Гуком принадлежит определение (1665) постоянных точек термометра — точки кипения воды и точки таяния льда. В рассуждениях «О причинах тяжести» (приложение к «Трактату о свете») Гюйгенс близко подошел к открытию закона всемирного тяготения. Вслед за Декартом он пытался создать вихревую теорию тяжести.

Гюйгенс защищал механистическое объяснение физических явлений. В XVII веке, когда еще не были полностью изгнаны из физики схоластические учения о таинственных «скрытых», «абсолютных» свойствах тел, стремление объяснить явления природы на основе *вполне доступных для изучения* механических движений было чрезвычайно прогрессивным.

В своем последнем трактате «Космотеорос» (1698, опубликован посмертно) Гюйгенс защищал становившуюся все более популярной в XVII веке идею множественности миров, за которую в свое время так мужественно боролись Бруно, Кеплер, Галилей и др. «Было бы неразумно думать,— писал Гюйгенс,— что небесные тела, между которыми наша Земля занимает столь ничтожное место, были созданы единственно для того, чтобы мы, ничтожные люди, могли пользоваться их светом и созерцать их положение и движения». Это сочинение Гюйгенса, по указу Петра I, было в 1717 году переведено на русский язык.

Многие сочинения Гюйгенса, как и последний трактат, увидели свет только после его смерти.

Гюйгенс умер 8 июня 1695 года.

ТРУДЫ Х. ГЮЙГЕНСА

Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. Пер., ред. и примеч. проф. К. К. Баумгарта. Л., 1951. 379 стр.; 4 л. илл. и портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

Три классических работы Хр. Гюйгенса: Маятниковые часы. — О движении тел под влиянием удара. — О центробежной силе.

Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и при прелюмлении, в частности при странном преломлении исландского кристалла. Пер. Н. Фредерикс. Ред. и примеч. В. Фредерикса. М., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 172 стр.; 1 л. портр.

Трактат состоит из следующих глав: Предисловие. — О лучах, распространяющихся прямолинейно. — Об отражении. — О преломлении в воздухе. — О своеобразном преломлении в исландском кристалле. — О формах прозрачных тел, служащих для преломления и отражения.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Х. ГЮЙГЕНСА

Вавилов С. И. Гюйгенс Христиан.—БСЭ, т. 20, 1930, стб. 83—85.

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 129—131.

Идельсон Н. И. Гюйгенс Христиан.— БСЭ, 2-е изд., т. 13, 1952, стр. 248—250, портр.

Баумгарт К. К. Работы Христиана Гюйгенса по механике. — В кн.: Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. М., Акад. наук СССР, 1951, стр. 289—315.

В статье дана общая оценка научной деятельности Гюйгенса, показано, что сделано им в области механики, разобраны в наиболее существенных их положениях три основные работы Гюйгенса: «Маятниковые часы», «О движении тел под влиянием удара», «О центробежной силе».

Эти же проблемы в более специальной форме освещены в статье:

Котов В. Ф. Принципы механики Гюйгенса. — «Ученые записки Горьк. гос. ун-та», 1939, вып. 6, стр. 84—105.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 176—179, 220—222.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 175—183.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 163, 167—171, 184—189, 273—275, 420—423. Т. 2, стр. 18, 53, 397—398.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 151—158.

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 672—694.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 53—56, 149—152, 232—258 и др. (см. именной указатель).

РОБЕРТ ГУК

(1635—1703)

Выдающийся английский ученый-энциклопедист, конструктор и изобретатель Роберт Гук родился 18 июля 1635 года на о. Уайте (Англия) в семье деревенского священника. После окончания частной школы в Вестминстере Гук в 1653 году поступил в Оксфордский университет, славившийся серьезной постановкой преподавания математики и механики.

Незаурядные способности Гука к механике, особенно к изобретению и конструированию различных приборов и инструментов, проявились еще в школе. Там же, читая труды Эвклида по геометрии, Гук впервые серьезно познакомился с математикой.

Уже в университетские годы Гук принимал активное участие в работе Оксфордского кружка ученых и врачей, из которого впоследствии выросло крупнейшее научное объединение Англии — Лондонское королевское общество. Вся последующая научная деятельность Гука теснейшим образом связана с этим обществом. В 1662 году он как блестящий экспериментатор занял в нем должность «куратора (попечителя) экспериментов», а с 1663 года стал действительным членом общества. К этому времени Гук имел уже ученую степень магистра.

В 1677—1682 гг. Гук был секретарем Лондонского королевского общества и заведовал изданием его трудов. Деятельность Лондонского общества в течение первых двух десятилетий его существования проходила при постоянном и активном участии в его работах Роберта Гука.

С 1665 года Гук стал профессором геометрии в Грешам-колледже в Лондоне. За небольшое вознаграждение он читал в эти же годы публичные лекции [1], имевшие всегда огромный успех.

Научная деятельность Гука отличалась исключительной разносторонностью. Гуку принадлежит ряд технических усовершенствований и

[1] Так называемые кутлеровские чтения, по имени Лондонского мецената Кутлера, на средства которого были организованы эти лекции.

изобретений. Совместно с Бойлем он усовершенствовал воздушный насос (изобретенный Отто Герике), использование которого позволило Бойлю провести многие важные исследования свойств газов. Гук успешно работал над улучшением часовых механизмов; ему же принадлежит целый ряд оригинальных конструкций секстанта, квадранта и других мореходных инструментов.

Полет изобретательской мысли Гука далеко обгонял уровень развития современной ему техники. Так, он серьезно обдумывал проблему летания по воздуху и пытался сконструировать искусственные мускулы, которые могли бы удерживать человека в воздухе.

Гук изобрел поворотный барометр и один из первых предложил использовать его для предсказания погоды. Он сконструировал также сложный микроскоп, с помощью которого провел весьма важные наблюдения в области биологии и впервые наблюдал клеточное строение растительных и животных тканей. Эти исследования, как и сам микроскоп, Гук описал в своем знаменитом труде «Микрография» (1665).

К важным научным открытиям Гука принадлежит установление им совместно с Гюйгенсом (1665 г.) существования физических констант — точки кипения и точки плавления вещества. Это впервые позволило создать единую шкалу температур и по существу положило начало развитию научной термометрии.

За нулевой пункт шкалы термометра Гук предложил принять температуру таяния льда.

К 1660 году относится открытие Гуком важного в механике и технике закона пропорциональной зависимости между силой, приложенной к упругому твердому телу, и его деформацией (впервые опубликовано в 1678 г.). Этот закон известен в настоящее время под именем закона Гука. Закон Гука справедлив для всех употребляемых в технике материалов лишь при упругом состоянии тела, т. е. для сравнительно небольших напряжений и деформаций, не выше некоторых пределов, характерных для каждого данного материала (так назыв. Гукова область).

Обобщенный и уточненный в дальнейшем (О. Коши — 1822 г. и Дж. Грин — 1837 г.) закон Гука лежит в основе современной теории упругости и теории сопротивления материалов.

Кроме механики, Гук вел исследования в других областях физики, в астрономии, метеорологии, химии, биологии, геологии, археологии.

В 1665 г. появился знаменитый в истории естествознания труд Гука — «Микрография», итог его творческих исканий в области физики, бактериологии, гистологии и др.

Круг интересов Гука был настолько широк, что это не позволяло ему заняться упорным, систематическим изучением какого-либо одного явления или области явлений. Этим в большой степени объясняется то, что Гук, неоднократно высказывавший гениальные идеи, вплотную подошедший к ряду фундаментальных открытий, не доводил своих исследований до конца и не дал своего имени почти ни одному из этих открытий (исключение составляют лишь его исследования явления упругости). Так, еще до Ньютона Гук много занимался изучением силы тяжести на Земле, говорил о возможности объяснить кривые траектории

планет действием на них силы тяготения, зависящей от квадрата расстояния между Солнцем и планетой, но окончательно установил закон всемирного тяготения Ньютон. Гук много сделал для усовершенствования маятника, но строгую теорию маятника дал его современник Гюйгенс. Гуку принадлежат глубокие идеи о волновой природе света и поперечности колебаний световых волн (1672 г.). Однако первую волновую теорию света дал Гюйгенс. Идею же поперечности световых волн совершенно забыли, и она вновь была возрождена Френелем в начале XIX в.

Одним из первых, еще до аналогичных работ Ньютона, Гук занялся исследованием явления радужного окрашивания тонких пленок (например нефти на поверхности воды). Он первый подметил зависимость цвета пленок от их толщины и высказал глубоко правильную мысль, что окрашивание пленок обусловлено отражением луча от передней и задней поверхностей пленки. Согласно объяснению Гука, окрашивание пленок происходит оттого, что на сетчатке глаза эти отраженные лучи «различным образом» сталкиваются. Все эти соображения, высказанные в конце XVII века, на заре развития физической оптики, более чем за 100 лет до открытия интерференции, говорят о большой физической интуиции Гука. В оптике он занимался также изучением преломления света в веществе.

В области учения о строении вещества Гук стоял на точке зрения, близкой к кинетическим воззрениям, утверждая, что все тела состоят из мельчайших движущихся частиц. Под влиянием механистической философии Декарта Гук считал возможным объяснить все свойства тел на основе механических движений их частиц. Одной из наиболее общих сил в природе Гук считал силу тяготения; он пытался связать с нею магнитные и электрические силы.

В каждую область знания, которой он занимался, Гук вносил новые, смелые мысли, опережавшие современное ему состояние науки.

В астрономии Гуку принадлежит одна из наиболее ранних попыток выяснить природу комет. В химии он подходил к открытию роли воздуха в явлении горения, т. е. к теории горения, созданной в XVIII веке Лавуазье. В биологии Гук высказывал мысли об эволюционном развитии животных видов, об историческом изменении видов под влиянием внешних условий и в результате скрещивания.

В 1705 году были выпущены «Посмертные произведения» Гука („The posthumous works of Robert Hooke").

Большой биографический интерес представляют «Дневники» Гука („The diary of Robert Hooke". London, 1935).

В историю мировой науки Гук вошел прежде всего как гениальный физик и механик, один из основателей опытного естествознания. В последние годы жизни Гук начал большой труд по теории экспериментального метода в науке, однако успел выполнить его лишь в черновом виде. Эта работа Гука, несмотря на содержащиеся в ней ценные мысли, не была замечена современниками.

Роберт Гук умер 3 марта 1703 года в Лондоне.

ТРУДЫ Р. ГУКА

Гук Р. Общая схема или идея настоящего состояния естественной философии. Каким образом могут быть исправлены ее недостатки при помощи методического производства опытов и собирания наблюдений. Как составлять естественную историю в качестве солидного базиса, на котором могла бы быть построена истинная философия. Пер. А. И. Рубина под ред. Т. И. Райнова. — В кн.: Научное наследство. Т. 1. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 687—767.

Работа была впервые опубликована в Англии в 1705 году. В обширном предисловии Т. И. Райнова «Общая схема» определяется как «работа одного из лучших экспериментаторов своего времени».

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Р. ГУКА

Гук Роберт (1635—1703). — БСЭ, 2-е изд., т. 13, 1952, стр. 188.

Лебедев В. И. Роберт Гук. К 300-летию со дня рождения. — «Наука и жизнь», 1936, № 1, с. 48—50, илл.

Биография Гука. Роберт Гук — «куратор опытов» в Лондонском королевском обществе. Изобретения Гука. Гук и Ньютон.

Райнов Т. И. Роберт Гук и его трактат об экспериментальном методе. — В кн.: Научное наследство. Т. 1. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 655—686, илл.

Наиболее яркое и глубокое из того, что написано о Гуке на русском языке. Характеризуя творческий облик выдающегося ученого, инженера и конструктора, автор особо подчеркивает, что «ученый гений Гука всегда оставался одновременно и техническим», что именно это и определило собою методологию и методику эксперимента, в котором Гук был замечательным мастером. Специальные разделы биографии посвящены анализу методологического трактата Гука — «Общая схема».

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского. М., Гостехиздат, 1957, стр. 28—32.

Глава 1: Сопротивление материалов в XVII веке. 4. Роберт Гук.

Биографические сведения о Гуке и анализ его работ в области механики упругих тел.

Павлов А. П. Роберт Гук, забытый эволюционист 17 века. — «Естествознание в школе», 1929, № 2, стр. 81—88.

Автор статьи — крупный русский геолог, академик А. П. Павлов (1854—1929). Освещаются главным образом работы Гука в области геологии и биологии. Хотя к физике эта статья непосредственно не относится, она ценна все же тем, что дополняет представление о Гуке как о разностороннем ученом.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юношл. лит., 1937, стр. 189—198.

Глава: Роберт Гук.

Кроме кратких биографических сведений, приводятся отрывки из произведений Гука: «Микрография» и «Опыт доказательства вращения Земли»; излагаются его взгляды на природу теплоты, его мысли о всемирном тяготении.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 198—199.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 187, 191.

Лакур П. и **Аппель Я.** История физики. Т. 1, стр. 172—173, 297—303, 396 и др. (см. именной указатель). Т. 2, стр. 28, 58, 397, 405.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 145—149, 189—191, 207 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3, отд. 1, стр. 310—316.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 217—219, 222—223 и др. (см. именной указатель).

Лункевич В. В. От Гераклита до Дарвина. Очерки по истории биологии. Т. 2. XVII и XVIII вв. М.—Л., Акад. наук СССР, 1940, стр. 60—64.

На немногих страницах, посвященных Гуку, говорится главным образом о его «Микрографии». Отмечается необыкновенное богатство идей этого труда, содержание которого «так же многообразно, как и вся научная деятельность Гука».

* *
*

О деятельности Гука в той или иной форме говорится почти во всех биографиях Ньютона и в литературе о трудах Ньютона.



ИСААК НЬЮТОН

(1643—1727)

Великий английский физик и математик Исаак Ньютон своими работами завершил важный период в истории развития современного естествознания, начатый Галилеем, — период создания классической механики. Ньютон открыл основные законы механического взаимодействия тел не только на Земле, но и в окружающей нас Вселенной и тем самым заложил основы небесной механики.

Исключительно большим вкладом в науку явились знаменитые оптические открытия Ньютона, который одним из первых начал исследования в области физической оптики. Объясняя открытые им явления, Ньютон, склонявшийся больше к корпускулярной гипотезе света, сделал в то же время чрезвычайно глубокий и верный вывод о периодическом характере процесса распространения света.

Наконец, благодаря гениальным математическим открытиям Ньютона и Лейбница, физика была вооружена таким мощным аппаратом исследования, как дифференциальное и интегральное исчисления.

Ньютон родился 4 января 1643 года в местечке Вулсторп, в семье небогатого фермера. Двенадцати лет его отдали в школу в близлежащем городке Грэнтэм. Вначале он не отличался заметными успехами в ученье, но потом сильно заинтересовался математикой. Когда через год учебы его из-за материальных затруднений взяли домой, чтобы приучить к хозяйству, Ньютон проявил такое равнодушие и неспособность к подобного рода занятиям, что в 1660 году его снова возвратили в школу. На следующий год он был принят в один из колледжей Кембриджского университета — Тринити-колледж, по бедности — на казенное содержание. В колледже Ньютон, не удовлетворенный официальными учебниками, которые казались ему слишком тривиальными, начинает самостоятельно изучать «Геометрию» Декарта, «Арифметику бесконечного» Уоллиса и «Оптику» Кеплера.

В 1665 году Ньютон окончил Тринити-колледж и получил степень баккалавра, а затем магистра. В 1669 году он занял физико-математическую кафедру в Кембриджском университете. С этого времени в те-

чение 27 лет Ньютон читал лекции по математике и оптике. Однако лекции его, слишком сложные, были мало доступны слушателям, и порой ему приходилось читать их перед полупустой аудиторией.

В эти же годы Ньютон начал свои научные исследования. Период 60—80-х гг. был наиболее плодотворным в деятельности ученого. К этому времени относятся его фундаментальные открытия в области математики, механики и оптики.

Величайшие заслуги Ньютона перед человечеством были признаны уже его современниками. В 1672 году Ньютон был избран членом Лондонского королевского общества, а с 1703 года и до конца жизни был бессменным его президентом. Кроме того, он был иностранным членом Парижской Академии наук (с 1699 г.).

После политического переворота 1688 года в Англии Ньютон был избран членом парламента от университета и занимал этот пост в течение года. В 1690 году он уехал в Кембридж и жил там до 1696 года, продолжая заниматься науками. Однако эти работы уже не прибавили чего-либо существенного к его прежним открытиям.

В 1696 году Ньютон был назначен хранителем Монетного двора в Лондоне и отдавал много времени и сил этой работе.

Из научных исследований Ньютона в этот последний период его жизни следует отметить занятия теплофизикой, в частности открытие им закона охлаждения тел (1701 г.). В основном же он занимался изданием ранее написанных научных трудов (в 1704 г. вышла «Оптика» Ньютона, в 1713 г. — второе издание «Начал»).

Ньютон умер 31 марта 1727 года в Кенсингтоне (ныне часть Лондона) и был похоронен в Вестминстерском аббатстве — пантеоне великих людей Англии.

Авторитет Ньютона как ученого и при жизни, и после смерти был огромен. В математике возникла школа Ньютона. В физике — механике, оптике и других ее областях — более столетия господствовало направление, известное под именем ньютонианского.

Сам Ньютон говорил о своих открытиях: «Если я видел дальше, других, то потому, что стоял на плечах гигантов». Действительно, великие открытия Ньютона были подготовлены деятельностью целого ряда выдающихся ученых.

Первым из них был великий немецкий астроном Иоганн Кеплер. В начале XVII века он открыл законы обращения планет вокруг Солнца, окончательно опровергнув религиозный миф о «неземном», идеальном, равномерном круговом движении небесных тел. Уже сам Кеплер пытался объяснить открытые им закономерности движений планет действием притяжения со стороны Солнца. Однако в то время, когда еще не были созданы основы динамики, это оказалось невозможным.

В течение XVII века отдельные основные принципы динамики были сформулированы Галилеем, Декартом, Гюйгенсом; в работах Гассенди, Буллиальда, Гюйгенса, Роберваля, Гука, Галлея постепенно, все более отчетливо формировалась идея тяготения; Дж. Борелли выступил в 1666 году с попыткой объяснить законы движения планет одновременным действием центробежной и центростремительной сил.



Исаак Ньютон

В области оптики Гримальди, Гук, Бойль наблюдали цвета тонких пластинок, а Гук впервые пытался дать этому научное объяснение.

В работах Декарта, Кавальери, Ферма́, Уоллиса, Барроу вызревал новый, величайший по своей научной ценности метод математического анализа, основанный на идее переменной величины.

Однако понадобился гений Ньютона, чтобы сопоставить разрозненные открытия, заполнить пробелы, сделать обобщающие выводы из отдельных фактов и превратить все это в единую, стройную систему законов, в научную теорию.

Исследования Ньютона начались его математическими работами. Ему принадлежат важнейшие труды по теории рядов, по алгебре, аналитической и проективной геометрии. Но основной и величайшей заслугой Ньютона в области математики является создание им (независимо от Лейбница) метода дифференциального и интегрального исчислений, т. е. метода изучения процессов при помощи расчленения их на элементарные, бесконечно-малые переменные части, метода математического анализа явлений. В трудах Ньютона он получил наименование «метода флюксий». Основной труд Ньютона в этой области — «Метод флюксий и бесконечных рядов с приложением его к геометрии кривых» — был закончен около 1671 года и опубликован после его смерти — в 1736 году.

Следует отметить, что в математике, в отличие от Лейбница, Ньютон выступал прежде всего как механик. Математические понятия он рассматривал как абстрагированные понятия механики. Разработанный им «метод флюксий» был для него только инструментом для исследования механических явлений.

Основные открытия Ньютона в области механики были изложены им в 1687 году в монументальном труде «Математические начала натуральной философии».

Первая книга «Начал» посвящена теории тяготения и движения под действием различных центральных сил; вторая — учению о сопротивлении среды; в третьей, последней, излагается небесная механика, или «система мира» Ньютона.

В этом сочинении Ньютон сформулировал свои знаменитые три аксиомы механики — гениальное обобщение многовекового опыта науки и практики: 1) закон инерции, 2) закон изменения количества движения пропорционально приложенной силе и 3) закон равенства действия и противодействия.

Ньютон дал формулировку закона инерции, более точную, чем Декарт, хотя и не связывал его с идеей сохранения движения. Он уточнил понятие массы и доказал опытным путем тождество инертной и весомой масс.

Второй закон Ньютона, позволяющий вывести зависимость пути от времени и определить траекторию движения, явился и продолжает оставаться ключом к решению обширного круга конкретных задач физики, астрономии, а также техники.

Большое значение в технике имеет и третий закон Ньютона, однако наиболее широкое применение он нашел в небесной механике.

В «Началах» Ньютон впервые доказал тождественность силы тяжести на Земле и силы тяготения небесных тел друг к другу и нашел математическое выражение силы тяготения любых двух материальных частиц друг к другу. Таким образом, был открыт универсальный закон всемирного тяготения, объяснивший все наблюдаемые движения в Солнечной системе, а впоследствии и движения звезд.

Исходным пунктом для Ньютона в открытии закона всемирного тяготения были эмпирически полученные Кеплером законы движения планет, основы динамики, заложенные Галилеем, и, наконец, качественная теория центростремительной силы при круговом движении, построенная Гюйгенсом.

Все три закона Кеплера, равно как и все наиболее существенные отклонения от них, были выведены Ньютоном как следствия закона всемирного тяготения. Ньютон первый высказал мысль, что этот закон, а следовательно, и законы Кеплера распространяются не только на планеты, но и на кометы, и что траектории этих небесных тел могут представлять собою любые конические сечения.

На основе учения о тяготении Ньютон дал теорию фигуры Земли, правильно указав, что она должна быть сжатой у полюсов.

Теория тяготения Ньютона выдержала жестокую борьбу с картезианской физикой, господствовавшей в начале XVIII века. Градусными измерениями, организованными Парижской Академией наук в 1735 — 1744 гг., была доказана справедливость ньютоновой теории фигуры Земли. На основе теории тяготения Ньютона знаменитый французский математик А. Клеро предсказал момент прохождения кометы Галлея через перигелий (1759 г.). В 1798 году Г. Кэвендиш экспериментально доказал действие закона всемирного тяготения между любыми телами на Земле. Триумфом небесной механики Ньютона явилось открытие в 1846 году в результате теоретических работ французского астронома У. Леверрье и английского астронома Дж. Адамса планеты Нептун.

Великие открытия Ньютона оказали колоссальное влияние на всю физику. В течение почти полутора веков после него физика во всех своих областях развивалась на основе его механики. Вплоть до конца XIX века в физике господствовала теория дальнодействия — лежащая в основе ньютоновой теории тяготения идея мгновенной передачи действия от одного тела к другому на расстоянии через пустоту.

Только в середине XIX века Фарадей и Максвелл впервые обнаружили, если не ошибочность, то во всяком случае ограниченность теории дальнодействия, показав неприменимость ее к области электромагнитных явлений.

Появившиеся в начале XX века теория относительности и квантовая механика окончательно доказали ограниченность области применения классической физики Ньютона — физики малых скоростей и больших, макроскопических масштабов.

Однако и теперь механика Ньютона продолжает с успехом служить для объяснения и описания явлений в очень широкой области современной науки и техники.

Наряду с математикой и механикой третьей областью, где в полной мере проявился гений Ньютона, была оптика.

В 1666 году, работая над усовершенствованием астрономических объективов, Ньютон открыл с помощью трехгранной стеклянной призмы явление дисперсии — различного преломления лучей разного цвета — и вычислил показатели преломления для семи основных цветов спектра. В процессе опытов с призмой Ньютон открыл хроматическую аберрацию объективов. С этим открытием Ньютона связан любопытный научный парадокс, наглядно показывающий, насколько сложными, непредвиденными путями идет порою развитие науки. Сделав ошибочный вывод, что хроматическая аберрация — принципиально неустранимый дефект линзовых объективов, Ньютон в поисках ахроматического объектива изобрел оригинальной системы рефлектор — отражательный телескоп, где вместо линзы употребляется вогнутое сферическое зеркало, как известно, не обладающее хроматической аберрацией.

В 1675 году Ньютон открыл явление, получившее позже наименование «колец Ньютона». Он объяснил это явление периодически сменяющейся на пути луча способностью его к отражению и преломлению, дав при этом количественную оценку этой способности для различных монохроматических лучей. Это по существу было первым измерением величины, пропорциональной длине световой волны [1]. Тогда же Ньютон наблюдал явление цветов тонких пластинок и один из первых (независимо от Гука) связал цвет с толщиной пластинки.

Вслед за Гримальди Ньютон наблюдал диффракцию света, однако, исходя из корпускулярной гипотезы света, объяснил ее неверно.

Ньютон был близок к открытию поляризации света — он пытался объяснить явление двойного лучепреломления, предполагая, что световые корпускулы обладают различными «сторонами».

Оптические открытия Ньютона были изложены им в большом труде «Оптика», первое издание которого вышло в 1704 году. Этот труд состоит из трех книг. Первая посвящена вопросам отражения, преломления и дисперсии света; вторая — цветам тонких пластинок, естественной окраске тел и чрезвычайно сложному явлению цветов толстых пластинок; третья — диффракции света и некоторым неоконченным, неразрешенным проблемам (в виде знаменитых «вопросов» Ньютона, предложенных им для дальнейшего исследования).

Этот труд сыграл большую роль как замечательный образец качественного и количественного эксперимента, виртуозным мастером которого был Ньютон.

Большое внимание Ньютон уделял вопросу о природе света. На протяжении многих лет он вновь и вновь возвращался к этому сложнейшему и загадочному вопросу: что такое свет? В разные годы появляются его работы: «Одна гипотеза, объясняющая свойства света, изложенные в нескольких моих статьях» (1675 г., издана в 1757 г.); «Новая

---

[1] В 1815 г. Френель показал, что величина интервала между двумя «приступами наилегчайшего отражения и прохождения» света, измерявшаяся Ньютоном, в действительности равна двойной длине световой волны.

теория света и цветов» (1672 г.) и, наконец, первое, а затем и второе издания «Оптики» (написана в 1687 г., издана в 1704 и 1717 гг.).

В историю учения о природе света Ньютон вошел как автор корпускулярной гипотезы. Впервые гипотезу о «телесности» света, согласно которой свет — это поток мельчайших световых частиц, Ньютон высказал в 1672 году, в связи с чем началась его длительная полемика с Гуком — сторонником волновой гипотезы.

Но взгляды Ньютона на природу света сильно менялись. В 1675 году он пытается создать компромиссную, корпускулярно-волновую гипотезу света: наряду с существованием корпускул Ньютон допускает наличие эфира, в котором под действием световых частиц возникают и распространяются волны.

В дальнейшем, отвергнув гипотезу эфира, Ньютон возвращается к корпускулярной гипотезе (1704 г.), затем вновь (1717 г.) обсуждает возможности существования и волновых свойств света.

Как уже было сказано, склоняясь более к корпускулярной гипотезе, Ньютон высказал мысль и о периодичности светового процесса. Этого положения — важнейшего в волновой теории света — не было даже в трудах Гюйгенса, общепризнанного творца волновой гипотезы. Впервые со всей определенностью оно было высказано именно Ньютоном, с гениальной физической интуицией проникавшим в природу явлений.

Вместе с тем Ньютон, с крайней осторожностью относившийся ко всякого рода непроверенным или недостаточно обоснованным гипотезам, не высказывался окончательно ни за одну из существовавших гипотез света, так как не имел достаточных доказательств ни той, ни другой.

Однако это вовсе не значит, как это ошибочно считали многие физики после Ньютона, что великий ученый вовсе не признавал гипотез. Анализ работ Ньютона показывает, что его знаменитое изречение «hypotheses non fingo» («не выдумываю гипотез») скорее отражает отрицательное отношение Ньютона к гипотезам, не имеющим под собой твердой фактической основы, а не к гипотезам вообще. «Ньютонианцы» превратили эту формулировку в абсолютный запрет всяких гипотез, что могло лишь принести вред науке. Ньютон фактически был автором многих замечательных физических гипотез. Ему принадлежит, в частности, исключительно глубокая атомистическая гипотеза о строении вещества, к которой он пришел в результате своих многолетних оптических и химических исследований. Одним из первых Ньютон высказал мысль о механической природе теплоты.

Сам Ньютон не придавал своим открытиям значения всеобъемлющих, все объясняющих законов. Считая процесс познания бесконечным, он говорил незадолго до своей смерти: «Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на берегу моря, развлекающимся тем, что от поры до времени отыскиваю камешек, более цветистый, чем обыкновенно, или красивую ракушку, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным» [1].

---

[1] Вавилов С. И. Исаак Ньютон. 2-е изд. М.—Л., 1945, стр. 218.

ТРУДЫ И. НЬЮТОНА

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. Пер. с латин., с примеч. и пояснениями А. Н. Крылова. — В кн.: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. 7. М.—Л., Акад. наук СССР, 1936. [4], 696 стр.; 1 л. диагр.

Классический труд Ньютона, впервые появившийся в свет в 1687 году. Русский перевод, выполненный академиком А. Н. Крыловым с латинского издания 1871 года, первоначально был опубликован в «Известиях Николаевской морской академии» за 1915 (вып. 4) и 1916 год (вып. 5).

Ньютон И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. Пер. с 3-го англ. изд. 1721 г. с примеч. С. И. Вавилова. Изд. 2-е, просмотр. Г. С. Ландсбергом. М., Гостехиздат, 1954. 367 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Механика, Физика. Астрономия).

Русское издание «Оптики» в переводе академика С. И. Вавилова было впервые выпущено в 1927 году к 200-летию со дня смерти Ньютона. В новом издании воспроизводится текст перевода, а также комментарии и примечания С. И. Вавилова. Послесловие к настоящему изданию написано академиком Г. С. Ландсбергом. В конце книги (стр. 366) приводится список работ академика С. И. Вавилова, посвященных Ньютону.

Ньютон И. Лекции по оптике. Пер., коммент. и ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., 1946. 295 стр. с илл.; 2 л. портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

«Лекции по оптике» И. Ньютон читал в 1669—1671 гг. Полное латинское издание впервые появилось в 1729 году. Настоящий русский перевод является первым полным переводом этого труда Ньютона на живой язык. Перевод выполнен с латинского издания 1749 года. В статье С. И. Вавилова «Лекции по оптике Ньютона», помещенной в конце книги (стр. 260—275), изложена история «Лекций», раскрыто их содержание, охарактеризованы взгляды Ньютона на природу света в период, когда он писал свои «Лекции».

Ньютон И. Оптические мемуары. — «Успехи физ. наук», 1927, т. 7, вып. 2, стр. 121—163.

Два мемуара: 1. Новая теория света и цветов (1672) 2. Одна гипотеза, объясняющая свойства света, изложенная в нескольких моих статьях (1675).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ И. НЬЮТОНА

Биографии и общие работы

Кравец Т. П., Кудрявцев П. С. и **Юшкевич А. П.** Ньютон Исаак. — БСЭ, 2-е изд., т. 30, 1954, стр. 237—241.

Столетов А. Г. Жизнь и личность Ньютона. — В кн.: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2, М.—Л., Гостехиздат, 1941, стр. 211—220.

Речь в соединенном заседании Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии и Московского математического общества 20 декабря 1887 года в связи с исполнившимся 200-летием со дня выхода «Математических начал натуральной философии».

Первоначально напечатано в сборнике: «Двухсотлетие памяти Ньютона (1687—1887)». М., 1888, стр. 5—12.

Лазарев П. П. Ньютон. — «Природа», 1927, № 5, стр. 319—328.

Краткий очерк жизни и деятельности.

Бачинский А. Исаак Ньютон. (По случаю двухсотлетия со дня смерти). — «Народный учитель», 1927. № 4, стр. 79—90.

Кудрявцев П. С. Исаак Ньютон. (К 225-летию со дня смерти). — «Физика в школе», 1952, № 2, стр. 17—20.

Кудрявцев П. С. Исаак Ньютон. Изд. 2-е, переработ. М., Учпедгиз, 1955. 127 стр., илл., портр. (Классики физики).

Популярный очерк жизни и деятельности, состоящий из трех глав: Эпоха великих открытий. — Жизнь Ньютона. — Открытия Ньютона.

Первая глава содержит сжатую характеристику естествознания XVII в., вторая — краткое жизнеописание Ньютона, третья — изложение его работ с общей оценкой его физических воззрений.

Вавилов С. И. Исаак Ньютон. 2-е изд., просмотр. и доп. М.—Л., 1945. 230 стр.; 14 л. илл. и портр. (Акад. наук СССР. Науч.-попул. серия).

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 288—467.

Лучшая и наиболее полная на русском языке биография Ньютона. Жизнь и деятельность великого ученого показана на широком историческом фоне. Раскрыто содержание его важнейших трудов и открытий. Значительное внимание уделено полемике (с Робертом Гуком, Лейбницем и др.), развернувшейся вокруг физико-математических идей Ньютона.

Для книги С. И. Вавилова характерно постоянное стремление ее автора устанавливать связи идей Ньютона не только с идеями его предшественников и современников, но и с последующим развитием физики, показать связи Ньютона с современностью. В целом, как было отмечено в одной из рецензий, перед нами — строго научно и вместе с тем увлекательно написанная книга о жизни и деятельности одного из великих новаторов науки, «прекрасный образец научно-художественной прозы»[1].

* *
*

Био Ж.-Б. Биография Ньютона. Пер. с франц. В. Ассонова. М., 1869. IV, 111 стр.; 1 л. портр.

Одно из первых научных жизнеописаний Ньютона, автором которого является крупный французский физик и астроном (1775—1862).

Маракуев Н. Н. Ньютон, его жизнь и труды. 3-е, испр. и значит. доп. изд. с прил. перевода двух статей из «Principia»: «О законах движения» и «О методе флюкций». М., 1900. 249 стр.; 1 л. портр.

Филиппов М. М. Ньютон, его жизнь и научная деятельность. Спб., 1892. 80 стр.; 1 л. портр. (Жизнь замечат. людей. Биогр. б-ка Ф. Павленкова).

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юнош. лит., 1937, стр. 199—225.

Краткая биография Ньютона и популярное изложение его опытов.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 200—258.

Глава VIII: Ньютон.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 198—227.

Глава XII: Исаак Ньютон.

---

[1] См. Юшкевич А. П. С. И. Вавилов как исследователь творчества Ньютона. — Труды Ин-та истории естествознания и техники Акад. наук СССР, 1957, т. 17, стр. 84—89.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 161—172, 189—214 и др. (см. именной указатель).

Любимов Н. А. История физики. Ч. 3. — «Журн. м-ва нар. просв.», 1897, № 4, приложение, стр. 1—21.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 2, стр. 207—231, 153—156 и др. (см. именной указатель).

Кузнецов Б. Г. Развитие научной картины мира в физике XVII — XVIII вв. М., Акад. наук СССР, 1955, стр. 155—254.

Раздел: Учение Ньютона о материи и движении.

Динамизм и физика принципов. Учение Ньютона об эфире и веществе. Учение о пространстве, времени и движении. Пространство и движение в механике Эйлера. Закон всемирного тяготения.

Физика Ньютона (в целом)

Столетов А. Г. Ньютон как физик. — В кн.: Столетов А. Г. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 539—552.

То же: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1941, стр. 221—232.

Речь в соединенном заседании Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии и Московского математического общества 20 декабря 1887 года в связи с 200-летием со дня выхода в свет «Математических начал» Ньютона.

Первоначально напечатано в сборнике «Двухсотлетие памяти Ньютона. (1687—1887)». М., 1888, стр. 35—44.

Крылов А. Н. Ньютон и его значение в мировой науке. 1643—1943. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943. 39 стр.

То же в кн.: Исаак Ньютон. Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 5—32.

То же: Собрание трудов академика А. Н. Крылова. Т. 1, ч. 2. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 227—261.

Доклад, прочитанный 4 января 1943 года на торжественном собрании Академии наук СССР, посвященном 300-летию со дня рождения Ньютона.

В сжатом обзоре трудов и открытий Ньютона автор концентрирует внимание вокруг главных идей, высказанных и обоснованных Ньютоном в его «Оптике», «Математических началах» и в трудах по математике. Многочисленные примеры, приведенные в обзоре, показывают, какие блестящие и глубокие работы возникли из идей Ньютона на протяжении последующего развития науки — мировой и русской.

Вавилов С. И. Ньютон и современность. — «Природа», 1943, № 1, стр. 76—79.

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 276—285.

Важнейшие принципы, развитые Ньютоном в его «Оптике» и в особенности в его «Математических началах натуральной философии», и их связь с современной физикой.

Вавилов С. И. Эфир, свет и вещество в физике Ньютона. — В кн.: Исаак Ньютон. 1643—1727. Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 38—52

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3, М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 209—234.

То же (с некоторыми изменениями и дополнениями) в кн.: Московский университет — памяти Исаака Ньютона. 1643—1943. М., МГУ, 1946, стр. 3—26.

Вавилов С. И. Атомизм И. Ньютона.— «Успехи физ. наук», 1947, т. 31, вып. 1, стр. 1—15.

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3, М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 715—729.

Доклад, прочитанный в Лондонском королевском обществе в июле 1946 года на праздновании 300-летия рождения И. Ньютона.

Основные положения статьи: анализ работ Ньютона позволяет прийти к выводу, что «Ньютон предугадал *все* в области атомизма, что было возможно в его время, на почве доступного ему экспериментального материала. *Он не ошибся ни в чем основном*»: по химическим и оптическим данным он своим проницательным взором усмотрел «контуры той теории строения вещества, на основе которого развивается новая физика».

Механика Ньютона

Жуковский Н. Е. Ньютон как основатель теоретической механики.— В кн.: Жуковский Н. Е. Собрание сочинений. Т. 7. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 83—93.

Впервые напечатано в сборнике: Двухсотлетие памяти Ньютона. (1687—1887). М., 1888, стр. 13—20.

Речь в соединенном заседании Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии и Московского математического общества 20 декабря 1887 года в ознаменование 200-летия со дня выхода в свет первого издания «Математических начал» Ньютона.

Крылов А. Н. «Начала» Ньютона. — В кн.: Ньютон. 1727—1927. Л., Акад. наук СССР, 1927, стр. 11—45.

Содержание трех книг знаменитого труда Ньютона с комментариями акад. А. Н. Крылова.

Эйнштейн А. Механика Ньютона и ее влияние на развитие теоретической физики.—«Под знаменем марксизма», 1927, № 4, стр. 166—173.

Эйнштейн А. Ньютон. (К двухсотлетию со дня смерти). — «Природа», 1927, № 6, стр. 425—434.

Одна и та же статья Альберта Эйнштейна в разных переводах, написанная в связи с 200-летием со дня смерти Ньютона.

Ламб Г. Работы Ньютона в области механики. — «Под знаменем марксизма», 1927, № 4, стр. 182—185.

Речь на ньютоновских торжествах в Грэнтэме 19 марта 1927 года.

Фредерикс В. К. Начала механики Ньютона и принцип относительности. — «Успехи физ. наук», 1927, т. 7, вып. 2, стр. 75—96.

Кирпичев М. В. Ньютон о подобии. — В кн.: Исаак Ньютон. 1643—1727. Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 264—270.

Идельсон Н. И. Галилей и Ньютон. — «Наука и жизнь», 1943, № 4—5, стр. 5—11, портр.

Работы Галилея и Ньютона в области механики.

Космодемьянский А. А. Работы Ньютона по динамике и гидродинамике.—В кн.: Московский университет — памяти Исаака Ньютона. 1643—1943. М., МГУ, 1946, стр. 81—88.

Михайлов А. А. Ньютон — творец небесной механики. — «Наука и жизнь», 1943, № 4—5, стр. 12—17.

Никольский К. В. Механика Ньютона и современная теоретическая физика. — «Природа», 1944, № 2, стр. 3—10.

Кузнецов Б. Г. Учение Ньютона об относительном и абсолютном движении. — «Известия Акад. наук СССР. Серия истории и философии», 1948, т. 5, № 2, стр. 149—166.

Фридман В. Г. Об учении Ньютона о массе. — «Успехи физ. наук», 1957, т. 61, вып. 3, стр. 451—460.

Учение Ньютона о массе, как оно раскрывается в «Математических началах натуральной философии».

Оптика Ньютона

Томсон Дж. Дж. Работы Ньютона в области физики. — «Под знаменем марксизма», 1927, № 4, стр. 174—181.

Речь в Грэнтэме (город, где Ньютон учился в начальной школе) 19 марта 1927 года по случаю 200-летия со дня смерти Ньютона. Автор ограничился рассмотрением работ Ньютона только в области оптики.

Вавилов С. И. Принципы и гипотезы оптики Ньютона. — «Успехи физ. наук», 1927, т. 7, вып. 2, стр. 87—106.

Лазарев П. П. Оптические работы Ньютона. — В кн.: Ньютон. 1727—1927. Л., Акад. наук СССР, 1927, стр. 46—53.

Мандельштам Л. И. Оптические работы Ньютона. — «Успехи физ. наук», 1946, т. 28, вып. 1, стр. 103—129, илл.

Доклад, прочитанный на Общем собрании академиков в Боровом 16 января 1943 года, заканчивается словами: «Современное здание оптики несравненно обширнее, чем оно было во времена Ньютона. Оно еще не закончено, но уже ясно, что архитектурный стиль его совершенно другой, чем при Ньютоне. Как оно будет выглядеть, мы в точности не знаем. Но если мы верим в его будущую крепость, то потому, что оно покоится на прочном фундаменте, краеугольным камнем которого остаются бессмертные творения великого Ньютона».

Слюсарев Г. Г. Работы Ньютона по геометрической оптике.—В кн.: Исаак Ньютон. 1643—1727. Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 127—141.

Хвостиков И. А. Ньютон и развитие учения о рефракции света в земной атмосфере. — В кн.: Исаак Ньютон. 1643—1727. Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения. М.—Л., Акад. наук СССР, 1943, стр. 142—160.

Аркадьев В. К. Оптика Ньютона и современная спектроскопия.— В кн.: Московский университет — памяти Исаака Ньютона. 1643—1943. М., МГУ, 1946, стр. 43—69.

Гуревич М. М. Теория цветов Ньютона. — «Успехи физ. наук», 1954, т. 52, вып. 2, стр. 291—310.

Разбор «Оптики» (1704 г.) и «Лекций по оптике» (1729 г.), в которых говорится о трехмерности цвета, о законах смещения и методах расчета цвета по известному составу, позволяет считать Ньютона основоположником современного учения о цвете. В вводной части статьи изложены представления о цвете в работах предшественников и современников Ньютона (Декарт, Гук и др.).

Юбилейные сборники

Двухсотлетие памяти Ньютона. (1687—1887). Речи, читанные в соединенном заседании имп. Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии и Московского математического общества 20 декабря 1887 г. профессорами: Н. Е. Жуковским, А. Г. Столетовым, В. К. Цераским и В. Я. Цингером. М., 1888. 51 стр.

Исаак Ньютон. 1643—1727. Сборник статей к трехсотлетию со дня

рождения. Под ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., 1943. 439 стр. (Акад. наук СССР).

В статьях сборника освещена деятельность Ньютона в области математики, физики, астрономии. Некоторые из этих статей перечислены выше, под рубриками «Оптика Ньютона», «Механика Ньютона» и др. Значительный интерес представляют еще следующие статьи:

Т. П. Кравец. Ньютон и изучение его трудов в России. — Т. И. Райнов. Ньютон и русское естествознание. — А. М. Деборин. Ньютон в истории культуры. — А. Д. Люблинская. К вопросу о влиянии Ньютона на французскую науку. (Спор ньютонианцев с картезианцами). — Е. Ч. Скржинская. Кембриджский университет и Ньютон. — П. Е. Дульский. Портреты Исаака Ньютона.

Московский университет — памяти Исаака Ньютона. 1643—1943. М., 1946. 107 стр. (Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова).

Статьи С. И. Вавилова, А. Н. Колмогорова, В. К. Аркадьева, Н. А. Глаголева, А. А. Космодемьянского, Г. Н. Дубошина, Н. И. Флерова о работах Ньютона в области физики, математики, астрономии и химии (статьи по физике указаны выше).

К 300-летнему юбилею относятся еще следующие материалы:

Капица П. Д. Выступление от имени Королевского общества в Лондоне на торжественном заседании в день 300-летия со дня рождения Исаака Ньютона. — «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1944, т. 8, № 4, стр. 169—171.

В Англии 300-летний юбилей Ньютона официально отмечался в 1946 г., по окончании войны. О своих впечатлениях рассказал член делегации Академии наук СССР на торжествах академик А. Е. Арбузов в статье:

Арбузов А. Е. Ньютоновские торжества в Лондоне (16—19 июля 1946 года). — «Вестник Акад. наук СССР», 1946, № 11—12, стр. 80—88.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Полной библиографии трудов Ньютона и литературы о нем, изданных на русском языке, не имеется. Ниже перечислены наиболее значительные библиографические указатели:

Краткий библиографический указатель. — В кн.: Вавилов С. И. Исаак Ньютон. 2-е изд., просмотр. и доп. М.—Л., Акад. наук СССР, 1945, стр. 223—225.

Указатель состоит из следующих частей: 1. Издания трудов и переписки Ньютона. 2. Русские издания трудов Ньютона. 3. Иностранные биографии Ньютона. 4. Русские биографии Ньютона. 5. Философия И. Ньютона. 6. Отдельные книги и статьи о Ньютоне.

Ньютон Исаак. — В кн.: История естествознания. Литература, опубликованная в СССР. (1917—1947). М.—Л., Акад. наук СССР. 1949, стр. 87—90, 174. — История естествознания. Литература, опубликованная в СССР. (1948—1950). М., Акад. наук СССР, 1955, стр. 109, 111—114.

ВЕНИАМИН ФРАНКЛИН

(1706—1790)

Вениамин Франклин — выдающийся физик и один из виднейших прогрессивных общественных деятелей Северной Америки XVIII века — родился 17 января 1706 года в г. Бостоне в семье английского ремесленника-эмигранта. С ранних лет он увлекался наукой и тратил на книги каждый попадавший к нему грош. Однако, несмотря на блестящие способности маленького Франклина, отец не мог дать ему систематического образования, и оно ограничилось двумя годами школьного обучения. С 10 лет Франклин сам стал зарабатывать на хлеб. Он побывал учеником в нескольких мастерских, работал в Бостоне в типографии своего брата, беззастенчиво эксплуатировавшего его, затем уехал в Нью-Йорк и, наконец, поселился в Филадельфии, где организовал свою собственную типографию и развернул широкую общественную деятельность.

Суровые годы юности дали Франклину немало практических навыков, развили его природный талант изобретателя и определили его особое, практическое отношение к науке, о котором много лет спустя хорошо сказал в своей яркой характеристике Франклина знаменитый английский химик и физик Дэви: «Никогда он не позволял себе соблазняться тем ложным достоинством, которое старается держать науку далеко от применений ее в обыденной жизни, напротив, он всегда старался сделать ее полезною сожительницей наших домов, верной спутницей всех и всякого состояния людей, а не выставлять ее, как делают многие другие, только как предмет удивления в храмах науки и дворцах богачей».

Захваченный деятельностью по изданию газеты, организацией первой в Америке публичной библиотеки, высшего учебного заведения — так называемой «Академии» (1749 г.), Франклин находил время и для научных занятий. Однако систематическими научными исследованиями он получил возможность заняться лишь в зрелом возрасте, когда ему



Веннамин Франклин

было уже за 40 лет. Случайно попав в 1746 году на сеанс «чудес физического кабинета» некоего доктора Спенса, где для развлечения публики демонстрировали самое модное «чудо» первой половины XVIII века — опыты с электрической машиной, Франклин увлекся ими и начал самостоятельные исследования в области электричества, проявив при этом блестящий экспериментаторский талант. В процессе этих опытов Франклин объяснил действие лейденской банки, изобрел и сконструировал первый плоский конденсатор, состоявший из двух параллельных металлических пластинок со стеклянной прослойкой между ними.

Но основной научной заслугой Франклина, обессмертившей его имя, является открытие электрической природы молнии.

Еще в 1747 году он высказал мысль о сходстве между электрической искрой, получаемой от электрофорной машины, и молнией, между легким потрескиванием в первом случае и громовыми раскатами во втором. Летом 1752 года с помощью гениально простых опытов Франклин окончательно доказал тождество земного и атмосферного электричества. Запустив во время грозы обычный бумажный змей, к концу бечевки которого был привязан металлический ключ, Франклин впервые наблюдал искру, с треском выскакивавшую из ключа при приближении его к металлическим предметам. Проводником электричества служила намокавшая во время дождя бечевка (змей удерживался в руках при помощи шелкового шнура-изолятора, который был также привязан недалеко от конца бечевки). В дальнейшем Франклин усовершенствовал свой опыт и демонстрировал его при большом стечении зрителей, получая искры в 70 и более сантиметров длиною, появление которых сопровождалось сильным треском.

Еще за 2 года до этого, в 1750 году, Франклин предложил простое, но чрезвычайно важное изобретение — молниеотвод, или, как его часто неправильно называют, громоотвод. Это изобретение вызвало вначале крайнее недоверие. В Лондонском королевском обществе сообщение о нем встретили насмешками. В Англии первый молниеотвод был установлен лишь в 1760 году (на Эдистонском маяке). Немало способствовал распространению молниеотводов взрыв от удара молнии в пороховой склад в г. Брешии (Англия), в результате которого погибло около 3 000 человек и была разрушена шестая часть города. Во Франции первым установил у себя молниеотвод Вольтер. Но и там еще в 1780—1784 гг. в г. С.-Омер муниципальные власти вели судебный процесс против одного из жителей, установившего на своем доме молниеотвод, оканчивавшийся мечом, обращенным к небу. Первый молниеотвод в России установил на своем доме Ломоносов. Вместе с Рихманом они занимались в эти годы изучением земного и атмосферного электричества и высоко оценили работы Франклина, которые явились для них стимулом к новым и смелым опытам.

Наряду с экспериментальными исследованиями Франклин одним из первых пытался разработать теорию электрических явлений. Он предложил так называемую «унитарную» теорию, в которой электрические явления объяснялись существованием одной электрической жидкости. Не вдаваясь в природу самой электрической жидкости, Франклин счи-

тал, что эта жидкость содержится в телах, в их нейтральном состоянии, в некотором определенном количестве. Увеличение ее в теле против нормы делает его наэлектризованным положительно, а уменьшение — отрицательно.

Теория Франклина была чисто качественной. Она не имела успеха у современников, так как на первый взгляд не вносила ничего принципиально нового по сравнению с господствовавшей тогда теорией Дюфе (1698—1739), исходившего из существования двух разнородных электрических жидкостей. Находясь в теле в одинаковых количествах, они делают его нейтральным, а разъединяясь, — заряженным так называемым «стеклянным» (+) или «смоляным» (—) электричеством. И все же теория Франклина оставила след в науке: впервые введенное в ней понятие положительного и отрицательного электрического заряда вносило определенность в учение об электричестве, не допуская существования каких-то других видов заряда, чего нельзя было сказать о терминах «смоляное», «стеклянное» электричество.

Сторонником унитарной гипотезы выступил в 50-е годы XVIII века Эпинус в России, распространивший эту гипотезу и на магнитные явления.

Результаты своих исследований по электричеству Франклин опубликовал в сочинении „New experiments and observations on Electricity, made in Philadelphia in America, communicated in several letters to P. Collinson, Esq. of London" («Новые опыты и наблюдения над электричеством, сделанные в Филадельфии в Америке, сообщенные в нескольких письмах Питеру Коллинсону», 1751). Эта небольшая книжка, переведенная вскоре на французский, итальянский и немецкий языки, принесла Франклину всемирную славу. Лондонское королевское общество вначале не обратило внимания на работу ученого-самоучки из далекой колонии, какой была Северная Америка в середине XVIII века. Однако, когда слава о поразительных опытах Франклина облетела Европу, он был избран членом Общества и в 1753 году удостоен высшей награды — золотой медали Коплея. В 1789 году Франклин был единогласно избран почетным членом Российской академии наук.

Наряду с признанием Франклина как ученого он приобрел в 60—80-е гг. исключительную популярность в европейских странах и в связи со своей выдающейся ролью в борьбе Североамериканских колоний за независимость. С именем Франклина непосредственно связаны важнейшие этапы этой замечательной эпохи в истории Соединенных Штатов.

Франклин вел переговоры с Англией и Францией, проявив выдающиеся способности дипломата и публициста. Он был одним из составителей и редакторов знаменитой «Декларации независимости» (1776). Исключительной заслугой Франклина было подписание им в 1783 году мирного договора с Англией, в котором признавалась независимость Северо-Американских Соединенных Штатов. В 1787 году он принимал самое деятельное участие в выработке конституции США.

Франклин положил начало аболиционистскому движению (против угнетения негров) и до самой своей смерти был председателем создан-

ного им общества противников рабства в США. За несколько дней до смерти он подписал петицию, в которой обращался к Конгрессу с требованием уничтожить рабство в Америке.

Умер Франклин 17 апреля 1790 года 84 лет от роду. Тридцать дней продолжался в США траур по выдающемуся ученому и борцу за независимость своей страны. Глубоким трауром была отмечена его смерть и в других странах.

Решением Всемирного Совета Мира имя Франклина было включено в список наиболее выдающихся представителей человечества, и в январе 1956 года весь культурный мир отмечал 250-летие со дня рождения этого замечательного ученого и гражданина, «...которого гений был красой человеческой природы и различные стремления которого послужили на пользу науке, свободе и отечеству» [1].

ТРУДЫ В. ФРАНКЛИНА

Франклин В. Опыты и наблюдения над электричеством. Пер. с англ. В. А. Алексеева. Ред. статья и комментарии Б. С. Сотина. М., Акад. наук СССР, 1956. 271 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики науки. 250 лет со дня рождения. 1706—1956).

В книге собраны впервые переведенные на русский язык письма Франклина, адресованные члену Лондонского королевского общества Питеру Коллинсону и другим ученым. Франклин описывает в них свои знаменитые опыты с лейденской банкой и с атмосферным электричеством, излагает созданную им теорию электричества, обосновывает принцип действия молниеотвода. Охватывая 20-летний период, письма позволяют проследить развитие идей Франклина и являются важнейшим источником для изучения его научной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ В. ФРАНКЛИНА

Среди произведений В. Франклина видное место занимают его автобиографические записки, изданные впервые в Париже в 1791 году под заглавием «Записки о частной жизни Вениамина Франклина, составленные им самим и обращенные к его сыну; с прибавлением исторического очерка его политической жизни и некоторых статей, относящихся к отцу свободы».

На русском языке эта автобиография напечатана в книге:

Жизнь Вениамина Франклина. Автобиография. — В кн.: Франклин В. Избранные произведения. М., Госполитиздат, 1956, стр. 418—554.

Существует на русском языке также два отрывка из «Автобиографии» Франклина.

Франклин В. Из «Автобиографии». Пер. с англ. Н. Волжиной. — «Иностр. лит.», 1956, № 1, стр. 187—197.

Перевод, с некоторыми сокращениями, первых двух глав из «Автобиографии», в которых рассказывается о годах детства и юношества Вениамина Франклина.

---

[1] Из постановления Конгресса США о 30-дневном трауре в связи со смертью Франклина (Абрамов Н. В. В. Франклин. Его жизнь, общественная и научная деятельность. Спб., 1891, стр. 79).

К изучению истории электричества. (Из автобиографических записок В. Франклина). — «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 3, стр. 97—104.

Отрывок из одиннадцатой главы «Автобиографии». Франклин рассказывает о том, как возникла и развивалась его научная деятельность. В комментариях М. И. Радовского приводятся тезисы письма Франклина к Коллинсону.

* *
*

Франклин, Вениамин (Бенджамин). — БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 419—421.

Кузнецов И. В. Вениамин Франклин — выдающийся американский ученый и общественный деятель.—«Коммунист», 1956, № 1, стр. 109—118.

Сотин Б. С. Бенджамин Франклин. (К 250-летию со дня рождения). — «Наука и жизнь», 1956, № 1, стр. 59—60, портр.

Старцев А. Франклин. (К 250-летию со дня рождения). — «Иностр. лит.», 1956, № 1, стр. 172—176.

Стекольников И. С. Вениамин Франклин. К 250-летию со дня рождения. — «Электричество», 1956, № 1, стр. 75—78, портр.

Дорфман Я. Г. Вениамин Франклин — выдающийся физик XVIII века. (К 250-летию со дня рождения). — «Природа», 1956, № 2, стр. 72—81, илл.

Статья в основном посвящена важнейшей научной заслуге Франклина — созданию теории электрических явлений, что позволило Эпинусу и Кэвендишу построить математические основы электростатики.

Баскин М. П. Вениамин Франклин. — В кн.: Франклин В. Избранные произведения. М., Госполитиздат, 1956, стр. 6—50, портр.

Основное внимание в этой работе уделено общественно-политической деятельности Франклина, характеристике его философских воззрений.

Радовский М. И. Вениамин Франклин. Краткий биографический очерк. Под ред. акад. В. Ф. Миткевича. М.—Л., Госэнергоиздат, 1941. 80 стр.

Значительное место отведено работам Франклина в области электричества.

Владимиров В. Н. Франклин. М., Жургазобъединение, 1934. 224 стр. с илл.; 11 л. илл. и карт. (Жизнь замечат. людей).

* *
*

17 января 1956 года состоялось посвященное Франклину торжественное заседание, организованное Академией наук СССР, Советским Комитетом защиты мира, Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова, Союзом писателей СССР и Всесоюзным обществом культурной связи с заграницей. С докладами о научной и общественной деятельности Франклина выступили академик П. Л. Капица и чл.-корр. АН СССР А. В. Ефимов.

Капица П. Л. Научная деятельность В. Франклина. — «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 2, стр. 65—75. То же: «Успехи физ. наук», 1956, т. 58, вып. 2, стр. 169—182.

Доклад посвящен главным образом развитию работ Франклина в области электричества.

Ефимов А. В. Общественная деятельность Вениамина Франклина.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 3, стр. 86—96.

Особый интерес представляют материалы, свидетельствующие об известности Франклина в России в XVIII в.

* *
*

Радовский М. И. Русско-американские научные связи в 18—19 вв. (Франклин и современные ему русские ученые). По материалам архива АН СССР. — «Вестник истории мировой культуры», 1957, № 2, стр. 100—106.

Дорфман Я. Г. и **Радовский М. И.** В. Франклин и русские электрики XVIII в.— Труды Ин-та истории естествознания и техники [Акад. наук СССР], т. 19, 1957, стр. 290—312.

Выдающиеся идеи, высказанные Франклином в области теории электричества, были с самого начала достойно оценены Ломоносовым, Рихманом и Эпинусом и получили в их трудах дальнейшее развитие.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юнош. лит., 1937, стр. 240—253.

Рассказ об опытах Франклина со статическим электричеством, об изобретении им молниеотвода.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 301—304.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 339—342.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 131, 234—251, 269.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 260—264.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 18—30.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 123—124, 126, 130—133.



МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛОМОНОСОВ

(1711—1765)

Великий русский ученый-энциклопедист М. В. Ломоносов родился 19 ноября 1711 года в деревне Мишанинской, Холмогорского уезда, Архангельской губернии, в семье крестьянина-помора. Суровые условия труда с детства закалили Ломоносова, воспитав в нем непреклонную волю и упорство в достижении намеченной цели. Эти качества сыграли немалую роль в его дальнейшей жизни и деятельности.

Учился Ломоносов вначале самостоятельно, по первым русским учебникам — «Арифметике» Магницкого и «Славянской грамматике» Смотрицкого, а затем, с 1731 года — в Москве, в Заиконоспасской Славяно-греко-латинской академии. Годам учения в академии Ломоносов был обязан главным образом знанием языков — греческого и особенно латинского,— официального языка в научном мире того времени. Уже в эти годы Ломоносов в подлиннике читал художественные произведения греческих авторов. Тогда же он впервые познакомился с физикой Декарта, широта и смелость мысли которого произвели на Ломоносова огромное впечатление. Первое соприкосновение с сокровищами мировой литературы и науки определило весь дальнейший творческий путь Ломоносова. Многогранная одаренность позволила ему соединить в себе ученого и поэта.

В декабре 1735 года Ломоносов был направлен в Университет при Петербургской академии наук, а осенью 1736 года — за границу для изучения естественных и технических наук. Три года он изучал физику в Марбургском университете у знаменитого в то время профессора Христиана Вольфа (учебник которого Ломоносов перевел в 1745 году на русский язык). В Фрейберге Ломоносов занимался химией и горным делом. Преодолевая материальные трудности, он на свои средства посетил многие другие города Германии, а также Голландии и в 1741 году возвратился в Россию с богатым запасом теоретических и практических знаний по самым различным отраслям науки и техники. В 1742 году Ломоносов был назначен «адъюнктом физического класса», а в 1745 году — профессором

химии и избран в члены Петербургской академии наук, с которой была связана вся его дальнейшая неутомимая деятельность. Ломоносов был, кроме того, иностранным членом Шведской и почетным членом Болонской академий наук (Италия).

Научные взгляды Ломоносова отличались большим новаторством, смелостью и были глубоко материалистическими. Пропагандируя опытное исследование, он уже в первых своих работах предостерегает от субъективных выводов. «Те, кто, собираясь извлечь из опыта истины, не берут с собой ничего, кроме собственных чувств,— писал он,— по большей части должны остаться ни с чем: ибо они или не замечают лучшего и необходимейшего, или не умеют воспользоваться тем, что видят или постигают при помощи остальных чувств» [1]. Ломоносов считал необходимым объединение опытного исследования с теоретическим осмысливанием явлений. «Велико есть дело,— писал он,— достигать во глубину земную разумом, куда рукам и оку досягнуть возбраняет натура: странствовать размышлениями в преисподней, проникать рассуждением сквозь тесные расселины и вечною ночью помрачненные вещи и деяния выводить на солнечную ясность» [2].

Отвергая теории «невесомых жидкостей», Ломоносов выступил представителем прогрессивного тогда механистического направления в физике и химии и стремился объяснить свойства тел движением составляющих их частиц. В начале 40-х гг. Ломоносов развил широкую атомистическую концепцию строения вещества, в основу которой легли представления о «корпускулах» (молекулах), состоящих в свою очередь из «элементов». «Корпускулы,— писал Ломоносов,— сущности сложные, не доступные сами по себе наблюдению, т. е. настолько малые, что совершенно ускользают от взора». И далее: «...Основание того, что свойственно природным телам, нужно искать в качествах корпускул и способе их взаимного расположения...» [3].

На основе этих молекулярно-атомистических представлений Ломоносов к 1750 году разработал свою кинетическую теорию теплоты. Уже в работе «Размышления о причине теплоты и холода» (1750 г.) он писал: «Мы утверждаем, что нельзя приписывать теплоту тел сгущению какой-то тонкой, специально для того предназначенной материи, но что теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи нагретого тела» [4].

Он подверг решительной критике теорию теплорода, выдвинув против нее ряд основанных на опыте убедительных возражений. В частности, он указал на то, что окалина железа, вес которой больше, чем вес чистого металла (по теории теплорода, за счет присоединения теплорода к железу при его нагревании), будучи восстановлена до чистого железа, теряет часть веса, хотя это восстановление также осуществляется сильным

---

[1] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 1. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 125.

[2] Ломоносов М. В. Избранные философские произведения. М., Госполитиздат, 1950, стр. 363.

[3] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 1. М.—Л., 1950, стр. 25.

[4] Там же, т. 2, М.—Л., 1951, стр. 53.



Михаил Васильевич Ломоносов

нагреванием, при котором теплород должен был бы войти, а не выйти из тела (окалины) и тем самым увеличить его вес. Наиболее убедительными являются его количественные опыты с прокаливанием тел в наглухо запаянных сосудах (1756 г.). Ломоносов показал в этих опытах, что общий вес вещества в колбе (сжигаемое тело и воздух) не изменяется и что, таким образом, вывод Бойля об увеличении веса колбы за счет теплорода ошибочен.

Но значение этих опытов Ломоносова было несравненно более велико. В результате их Ломоносов впервые установил основной закон химии — закон сохранения вещества при химических реакциях. В связи с этими исследованиями он высказал интересную мысль о самом процессе горения: «...при процессе обжигания к телам присоединяется некоторая материя, только не та, которая приписывается собственно огню» [1]. Следует отметить, что кислород в то время не был открыт и явление горения оставалось еще полной загадкой. Позднее, в 1774 году, Лавуазье с помощью такого же опыта, какой ставил Ломоносов, точными измерениями еще раз доказал закон сохранения вещества при химических реакциях и подтвердил справедливость своей кислородной теории горения.

Одной из наиболее важных научных заслуг Ломоносова является провозглашение им принципа сохранения материи и движения задолго до окончательного установления этого общего закона природы.

Впервые Ломоносов сформулировал этот принцип в 1748 году в письме к Леонарду Эйлеру, а затем в 1760 году в своем «Рассуждении о твердости и жидкости тел». «...Все перемены, в натуре случающиеся,— писал он,— такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому, так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте...» Считая движение и материю понятиями неразрывными, Ломоносов продолжает: «Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения; ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает» [2].

Большое значение в развитии фазики в России имели и работы Ломоносова по электричеству.

Ломоносов вместе со своим другом академиком Г. В. Рихманом одним из первых начал количественные исследования в этой области. Узнав о работах Франклина (см.), они проделали множество опытов с «громовой машиной» Рихмана (см.) На основании этих опытов Ломоносов пытался построить теорию атмосферного электричества, в частности теорию явления грозы. Причиной возникновения электричества в атмосфере он считал трение между восходящими и нисходящими теплыми и холодными потоками воздуха. Много внимания Ломоносов уделял изучению полярных сияний и впервые (1753 г.) указал на их электрическую природу. После трагической гибели Рихмана летом 1753 года Ломоносов, потрясенный этим несчастьем, тем не менее призвал ученых продолжать сме-

---

[1] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., 1951, стр. 47—49.

[2] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 3. М.—Л., 1952, стр. 383.

лые исследования электричества. Осенью того же года на публичном заседании Академии наук он выдвинул в качестве конкурсной задачи Академии проблему, которую считал наиболее актуальной: «сыскать подлинную електрической силы причину и составить точную ее теорию». По условиям конкурса Ломоносов сам не мог принять в нем участия, но в сочинении «Слово о явлениях воздушных, от електрической силы происходящих» (1753 г.) и еще более четко в 1756 году в работе «Теория электричества, изложенная математически» Ломоносов высказал оригинальные мысли о природе электричества, связывая его происхождение с движением микроскопических частиц эфира.

В оптике Ломоносов был сторонником волновой теории света. В сочинении «Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее» (1756 г.) он впервые поднял вопросы о наличии связи между физико-химическими свойствами тела и его цветом, между светом и электричеством и пытался установить эти связи. Своими многочисленными химическими опытами над приготовлением непрозрачных цветных стекловидных масс (смальт) для мозаики Ломоносов открыл возможность получать любой цвет комбинацией трех цветов — красного, желтого и голубого. Тем самым он экспериментально подошел к решению одной из важнейших проблем теории цветного зрения, которая была разработана лишь в XIX веке (Юнг, Гельмгольц и др.).

Ломоносов является одним из основоположников физической химии. Он впервые сформулировал ее основную задачу: объяснять «... на основании положений и опытов в физике то, что происходит в смешанных телах при химических операциях»[1]. В этой области Ломоносов проделал тысячи опытов, поставив перед собою цель: «испытывать все, что только можно измерять, взвешивать, определять вычислением». В созданной им при Петербургской академии наук знаменитой химической лаборатории он впервые в 1752—1753 гг. прочел курс лекций по физической химии («Введение в истинную физическую химию»).

Он изобрел и сконструировал множество физических, метеорологических и оптических приборов. Среди них — приборы для определения вязкости и твердости тел, «универсальный барометр» — прототип современного прибора для измерения силы тяжести («статического» гравиметра), прибор для определения показателя преломления вещества, усовершенствованный рефлектор (зеркальный телескоп) и др.

Ломоносов глубоко интересовался астрономическими проблемами. Он был решительным сторонником идеи бесконечности Вселенной и обитаемости других миров в ней. Одним из первых он занялся вопросом о физических свойствах небесных тел, изучал кометы, высказал глубокие догадки о физических явлениях на поверхности Солнца. В 1761 году при наблюдении прохождения Венеры по диску Солнца он открыл атмосферу на этой планете.

Заботясь о процветании науки и промышленности в России, Ломоносов вел исследования и во многих других областях современной ему нау-

---

[1] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., 1951, стр. 483.

ки и техники. Большой вклад внес он в горное дело и металлургию, где стремился вскрыть физико-химическую природу технологических процессов и активно внедрял методы точного количественного анализа. Основные результаты своих исследований в области геологии, горного дела и металлургии Ломоносов изложил в сочинении «Слово о рождении металлов от трясения земли» (1757 г.), а также в «Первых основаниях металлургии, или рудных дел» (1763 г.), которые были лучшим учебником для нескольких поколений русских металлургов. Проводя мысль о закономерном развитии природы, Ломоносов отвергал распространенную в XVIII веке теорию «потопа» и «катастроф» — гибели всех прежних видов животного мира и появления на их место совершенно новых. В работе «О слоях земных» (1763 г.) он писал: «...твердо помнить должно, что видимые телесные на земле вещи и весь мир не в таком состоянии были с начала от создания, как ныне находим, но великие происходили в нем перемены, что показывает история и древняя география, с нынешнею сносенная, и случающиеся в наши веки перемены земной поверхности»[1].

В том же сочинении Ломоносов высказал мысль о воздушном питании растений и предложил свою теорию растительного происхождения чернозема.

В связи с работой в Географическом департаменте, руководителем которого он был назначен в 1758 году, Ломоносов провел ряд важных географических исследований. Здесь, как и в других областях его деятельности, проявилась основная черта его творчества — стремление объединить науку с практическим ее приложением. В области географии Ломоносова особенно интересовала природа Северного Ледовитого океана. Он впервые дал классификацию льдов, правильно указал на образование айсбергов в результате сползания льда с материка в море, высказал мысль о существовании большого ледового дрейфа в северных морях, омывающих берега России (этот дрейф был открыт во второй половине XIX века). Ломоносов понимал большое экономическое значение морского пути в Индию через северные моря. В 1763 году он опубликовал сочинение «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию». Впервые Ломоносов стал заниматься экономической географией страны (ему принадлежит и термин «экономическая география»).

Необозримая широта научных интересов Ломоносова нашла яркое отражение и в его поэтическом творчестве.

Ломоносов много времени и сил отдавал литературной деятельности. Он по существу создал русский литературный язык, отделив его от церковнославянского, разрабатывал теорию тонического стихосложения и сам написал большое число од, поэм и стихов, в которых он нередко выступает ученым, философом, высказывает глубокие научные догадки, пропагандирует развитие наук в России.

Особенно велика роль Ломоносова как организатора науки в России. Занимая высокие административные посты — советника Канцелярии Ака-

---

[1] Ломоносов М. В. Избранные философские произведения. М., Госполитиздат, 1950, стр. 396.

демии наук, руководителя Географического департамента, Исторического собрания и других научных и учебных учреждений, Ломоносов усиленно развивал научные исследования, был организатором научных экспедиций и особенно много сил и энергии отдавал делу просвещения в России. Бессмертным памятником Ломоносову стал созданный им Московский государственный университет.

Мощью своего гения Ломоносов впервые наметил для будущих поколений русских ученых огромное поле деятельности, границы которого простирались от самых насущных задач развития промышленности до таких высот, как познание Вселенной.

Умер М. В. Ломоносов 15 апреля 1765 года. Могила его находится в Ленинграде, в Александро-Невской лавре.

ТРУДЫ М. В. ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ

Сочинения М. В. Ломоносова издавались много раз. Первое издание в двух книгах было предпринято еще по инициативе самого Ломоносова в 1751 году. В течение XVIII и XIX вв. вышло восемь изданий. Девятое издание, самое полное по сравнению со всеми предшествующими, было начато в конце XIX века Академией наук. Первый том этого издания вышел в 1891 году, восьмой и последний—в 1948 году. Это издание обладает высокими научными достоинствами, но все же не свободно от существенных недочетов. В него не вошли многие произведения М. В. Ломоносова (в частности по физике); отдельные работы, особенно по физике и химии, напечатаны только на языке оригинала, т. е. на латинском языке, и без примечаний.

В 1950 году Академией наук СССР было впервые предпринято издание полного собрания сочинений М. В. Ломоносова. В новое издание включено много не опубликованных ранее трудов Ломоносова; все его произведения, написанные на латинском языке, приведены также и в русском переводе. Все тома снабжены вспомогательным аппаратом.

Подробно об этом издании рассказано в статье:

Елисеев А. А. Издание полного собрания сочинений М. В. Ломоносова. — «Успехи физ. наук», 1950, т. 42, вып. 1, стр. 49—56.

Ниже перечисляются те тома этого издания, в которые вошли труды Ломоносова по физике:

Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 1—4. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950—1955.

Т. 1. Труды по физике и химии. 1738—1746 гг. 1950. 620 стр.; 6 л. илл., портр.

Из содержания. Работа по физике о превращении твердого тела в жидкое в зависимости от движения предшествующей жидкости (стр. 5—21).— Физическая диссертация о различии смешанных тел, состоящем в сцеплении корпускул.. (стр. 23—63).— Рассуждение о катоптрико-диоптрическом зажигательном инструменте... (стр. 85—101).— 276 заметок по физике и корпускулярной философии (стр. 103—167). Опыт теории о нечувствительных частицах тел и вообще о причинах частных качеств (стр. 169—235).— Заметки о тяжести тел (стр. 237—251).— 44 заметки о сцеплении корпускул (стр. 253—263).— О сцеплении и расположении физических монад (стр. 265—277).— О со-

ставляющих природные тела нечувствительных физических частицах, в которых заключается достаточное основание частных качеств (стр. 279—313).— О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном (стр. 315—331).— Волфианская экспериментальная физика... (стр. 419—530) и др.

Т. 2. Труды по физике и химии. 1747—1752 гг. 1951. 726 стр.; 5 л. илл. и портр.

Из содержания: Размышления о причине теплоты и холода (стр. 7—55).— Опыт теории упругости воздуха (стр. 105—139). — Письмо к Леонарду Эйлеру от 5 июля 1748 г. (стр. 169—193). — О тяжести тел и об извечности первичного движения (стр. 195—203). — Введение в истинную физическую химию (стр. 481—577).

Т. 3. Труды по физике. 1753—1765 гг. 1952. 605 стр.; 1 л. портр.

Из содержания: Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих (стр. 15—99). — 127 заметок к теории света и электричества (стр. 237—263).— Теория электричества, изложенная математически (стр. 265—313).— Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее... (стр. 315—344).— О природе света (стр. 345—348).— Об отношении количества материи и веса (стр. 349—371).— Рассуждение о твердости и жидкости тел (стр. 377—409).— Записка об опытах по замораживанию ртути (стр. 421—427). — Новый способ наблюдения преломления лучей во всякого рода прозрачных телах (стр. 441—445).— Сообщение о наблюдениях, подтверждающих электрическую природу северного сияния (стр. 477—479) и др.

Т. 4. Труды по физике, астрономии и приборостроению. 1744—1765 гг. 1955. 831 стр.; 3 л. илл.

Из содержания: Физическая задача о ночезрительной трубе (стр. 111—121).— Об усовершенствовании зрительных труб (стр. 471—487) и др.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ М. В. ЛОМОНОСОВА

Из обширной литературы о Ломоносове здесь приводятся лишь некоторые статьи и книги, преимущественно опубликованные за последнее время. Более полные материалы читатель найдет в библиографических указателях, перечисленных ниже, на стр. 107.

Топчиев А. В. Ломоносов Михаил Васильевич (1711—1765).—БСЭ, 2-е изд., т. 25, 1954, стр. 375—385, портр.

Вавилов С. И. Михаил Васильевич Ломоносов. — В кн.: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 770—791.

То же—в кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 63—82.

Меншуткин Б. Н. Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова. 3-е изд. с доп. П. Н. Беркова, С. И. Вавилова и Л. Б. Модзалевского. Под ред. С. И. Вавилова и Л. Б. Модзалевского. М.—Л., Акад. наук СССР, 1947. 295 стр.; 22 л. илл., 4 л. портр.

Морозов А. А. Михаил Васильевич Ломоносов. 1711—1765. Изд. 2-е, доп. и переработ. С предисл. акад. С. И. Вавилова. [Л.], Лениздат, 1952. 856 стр., илл., портр.

Наиболее обширное исследование жизни и творчества М. В. Ломоносова, при составлении которого использован широкий круг источников, в том числе и впервые введенных автором в научный оборот. Деятельность М. В. Ломоносова в области физики, химии и астрономии освещена в главах 9, 13 и 15.

Кузнецов Б. Г. Творческий путь Ломоносова. М., Гостехиздат, 1956. 380 стр. с илл. и портр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

В книге освещена эволюция естественных и эстетических воззрений М. В. Ломоносова, показана его борьба с метафизическими тенденциями в науке и литературе его времени.

Различные стороны творчества М. В. Ломоносова освещены в трех сборниках, выпущенных Комиссией по истории Академии наук СССР, начиная с 1940 года. Ниже приводятся те статьи и материалы из этих сборников, которые относятся к творчеству Ломоносова в области физики:

Ломоносов. Сборник статей и материалов. Отв. ред. акад. С. И. Вавилов. Т. 1—3. М.—Л., Акад. наук СССР, 1940—1951.

Т. 1. 1940. 411 стр.; 13 л. илл. и портр.

Из содержания: А. А. Елисеев. Физический кабинет Академии наук в первой половине XVIII в. и Ломоносов (стр. 173—206).— Т. И. Райнов. Русское естествознание второй половины XVIII в. и Ломоносов (стр. 318—388).

Т. 2. 1946. 305 стр.; 11 л. илл. и портр.

Из содержания: С. И. Вавилов. Ночезрительная труба М. В. Ломоносова (стр. 71—92).

Т. 3. 1951. 632 стр.; 8 л. илл. и портр.

Из содержания: Ф. Энгельс. Заметки о Ломоносове (стр. 11—13). — Б. М. Кедров и Т. Н. Чевцова. К публикации заметок Энгельса о Ломоносове (стр. 14—16).— К. С. Ляликов. Теория цветов Ломоносова (стр. 17—32).— Я. Г. Дорфман. Роль Ломоносова в истории развития молекулярно-кинетической теории теплоты (стр. 33—52).—В. Я. Билык. Исследования Ломоносовым и Брауном явлений при затвердевании ртути (стр. 53—65).—В. Л. Ченакал. Катоптрико-диоптрический зажигательный инструмент Ломоносова (стр. 66—83).— В. Л. Ченакал. Зеркальные телескопы Ломоносова (стр. 84—108).—В. Л. Ченакал. Сплавы Ломоносова для металлических зеркал (стр. 109—123).—А. А. Елисеев. Новые материалы об экспериментальных работах Ломоносова в 1744 г. в Физическом кабинете Академии наук (стр. 260—264).—В. Л. Ченакал. Зрительные трубы Ломоносова для экспедиции Чичагова (стр. 326—332).

ТРУДЫ М. В. ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Тверской П. Н. Современное состояние теории грозового электричества. (К двухсотлетию создания М. В. Ломоносовым первой научной теории грозы).— «Природа», 1954, № 2, стр. 30—40, илл.

Радовский М. И. Ломоносов и его исследования в области атмосферного электричества.— «Электричество», 1939, № 1, стр. 69—72, портр.

Федоров Е. К. «Слово о явлениях воздушных, от електрической силы происходящих» Ломоносова и современное представление об атмосферном электричестве.— «Известия Акад. наук СССР. Серия геогр. и геофиз.», 1950, № 1, стр. 25—36.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ М. В. ЛОМОНОСОВА ПО ОПТИКЕ

Вавилов С. И. Оптические воззрения и работы М. В. Ломоносова.— «Известия Акад. наук СССР. Отд. обществ. наук», 1937, № 1, стр. 235—247.

Доклад на торжественном заседании Академии наук СССР и Московского государственного университета 21 ноября 1936 года, посвященном 225-летию со дня рождения М. В. Ломоносова.

Соболь С. Л. История микроскопа и микроскопических исследований в России в XVIII веке. М.—Л., Акад. наук СССР, 1949. 606 стр.; илл. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания. Серия «Итоги и проблемы современной науки»).

В главе III книги (стр. 149—241) — «Михаил Васильевич Ломоносов и его время»— рассказано о работах М. В. Ломоносова с микроскопом, о введении им микроскопа в практику химических исследований, о конструктивных изменениях, которые М. В. Ломоносов предлагал внести в микроскоп.

Ченакал В. Л. Рефрактометр и рефрактометрические методы исследования в работах М. В. Ломоносова.— «Успехи физ. наук», 1950, т. 42, вып. 1, стр. 41—48.

Создание М. В. Ломоносовым рефрактометра и введение этого инструмента в практику научного исследования жидкостей по их показателю преломления.

Заслуги М. В. Ломоносова в других областях физико-математических наук освещены в работах:

Куликовский П. Г. М. В. Ломоносов — астроном и астрофизик. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 87 стр. с илл. и портр.

Перевалов В. А. М. В. Ломоносов и исследование полярных сияний.— «Природа», 1940, № 8, стр. 87—95.

Тимофеев А. Н. М. В. Ломоносов — основоположник статической гравиметрии.— «Природа», 1955. № 5, стр. 71—74.

В статье описан универсальный барометр, сконструированный М. В. Ломоносовым для наблюдения изменений силы тяжести.

Гайгеров С. С. О трудах Ломоносова в области метеорологии и гидрологии (Из истории исследований свободной атмосферы).— «Метеорология и гидрология», 1949. № 4, стр. 3—7.

Обзор исследований М. В. Ломоносова, явившихся началом научной метеорологии.

Гогоберидзе Д. Б. М. В. Ломоносов и учение о твердости.— «Природа», 1952, № 9, стр. 78—80.

Эту же тему несколько подробнее автор развил в статье:

Гогоберидзе Д. Б. Ломоносов и учение о твердости.— «Вестник Ленингр. ун-та», 1948, № 2, стр. 26—30.

Литинецкий И. Б. М. В. Ломоносов — основоположник отечественного приборостроения. М.—Л., Гостехиздат, 1952. 159 стр., илл., портр.

Работам М. В. Ломоносова по созданию физических приборов посвящены главы: Приборы для физико-химических исследований жидких и твердых тел.— Метеорологические приборы. — Измерение силы тяжести. — Универсальный барометр. — Большой маятник.— Приборы оптические.

* *
*

Большие разделы посвящены М. В. Ломоносову в следующих общих трудах по истории физики.

Кудрявцев П. С. История физики. 1956, стр. 259—357.
Глава: Физика XVIII в. Ломоносов.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 248—291, илл.
Глава: Физика М. В. Ломоносова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Коровин Г. М. Михаил Васильевич Ломоносов. Указатель основной научной литературы. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950. 71 стр. (Акад. наук СССР. Музей М. В. Ломоносова. Науч.-попул. серия).

В указателе перечислены основные издания сочинений Ломоносова и публикации его отдельных работ. Литература о М. В. Ломоносове представлена главным образом работами советских ученых. Из дореволюционной литературы включены высказывания о М. В. Ломоносове революционных демократов, виднейших русских ученых и писателей, а также посвященные ему сборники материалов и документов. Литература о деятельности Ломоносова как физика выделена в особый раздел (стр. 25—31).

Модзалевский Л. Б. Библиографический указатель основной литературы, относящейся к жизни и деятельности М. В. Ломоносова. — В кн.: Меншуткин Б. Н. Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова. 3-е изд. М.—Л., Акад. наук СССР, 1947, стр. 275—291.

Здесь также перечисляются основные издания собрания сочинений М. В. Ломоносова, биографии Ломоносова, сборники статей и материалов, работы о Ломоносове общего характера и по отдельным вопросам его научной, литературной и организаторской деятельности. Глава VII (стр. 281—282): Ломоносов как физик и химик.

Морозов А. А. Библиография [трудов М. В. Ломоносова и литература о нем].— В кн.: Морозов А. А. Михаил Васильевич Ломоносов. 1711—1765. Л., Лениздат, 1952, стр. 842—854.

Большое место в этой библиографии занимает раздел «Исследования и статьи, посвященные научной и литературной деятельности Ломоносова».

Рысс Е. Б. и **Коровин Г. М.** Библиография сочинений М. В. Ломоносова и литературы о нем за 1917—1950 гг.— В кн.: Ломоносов. Сборник статей и материалов. Т. 3. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 501—586.

Рысс Е. Б. Библиография основной литературы о М. В. Ломоносове за 1911—1916 гг.— В кн.: Ломоносов. Сборник статей и материалов. Т. 3. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 587—607.

В первый указатель вошли все произведения Ломоносова, изданные отдельными книгами, а также первые публикации ранее не изданных его сочинений, писем и служебных документов; литература на русском языке и языках народов СССР, целиком посвященная жизни и деятельности Ломоносова и отдельным сторонам его творчества; литература, частично посвященная Ломоносову. Указатель систематизирован. Имеется раздел: «Ломоносов — физик и химик» (стр. 521—534).

Второй указатель является продолжением большого указателя о Ломоносове, изданного в 1918 году и доведенного до 1911 года [1]. Имеется большой раздел «Ломоносов как естествоиспытатель» (стр. 592—596).

---

[1] Фомин А., Дукмейер К., Эллис Г., Мартен А., Иенсен А. Материалы по библиографии о Ломоносове. Пг., 1918. [8], 215 стр. (Акад. наук. Выставка «Ломоносов и елизаветинское время», т. 7).



ГЕОРГ-ВИЛЬГЕЛЬМ РИХМАН

(1711—1753)

Георг-Вильгельм Рихман родился 22 июля 1711 года в г. Пернове (Пярну) в Эстонии. Получив первоначальное образование в Ревеле (Таллин), он продолжал его в германских университетах — в гг. Галле и Иене. «Я,— писал о себе Рихман,— ... по природе лифляндец, учился... на собственном иждивении физическим и математическим наукам, в том намерении, чтоб со временем моими трудами российскому государству пользу учинить».

В начале 30-х годов Рихман приехал в Петербург. Здесь он поступил в 1735 году в Университет при Академии наук студентом по «физическому классу». В 1740 году Рихман назначается адъюнктом, в 1741 году — профессором (академиком) физики. С 1744 года и до своей трагической гибели Рихман руководил физическим кабинетом Академии наук, читая в то же время в академическом университете лекции по физике и математике. Физический кабинет благодаря заботам Ломоносова и Рихмана стал крупным научно-исследовательским центром.

Научная деятельность Рихмана была чрезвычайно широка. Он занимался коренными и актуальными в то время вопросами механики, много внимания уделял исследованиям в области молекулярной физики (исследование явления поверхностного натяжения) и физики газов. Рихман изучал также свойства магнитов и намагничение тел в различных условиях. Впервые в России Рихман занялся исследованием явления холодного свечения — люминесценции. Наиболее значительными являются работы Рихмана в области теплоты и электростатики.

Еще будучи студентом университета Рихман занялся калориметрическими исследованиями. В 1744 году он вывел основную формулу для определения температуры смеси однородных жидкостей, взятых при разных температурах, т. е. фактически еще до установления в науке поня-



Георг-Вильгельм Рихман

тия теплоемкости вывел уравнение теплового баланса для рассмотренного случая. В настоящее время разработанный Рихманом способ смешения жидкостей стал одним из основных методов определения теплоемкости. Следует отметить, что точность формулы Рихмана уступает точности аналогичной современной формулы лишь в том случае, когда теплоемкость заметно зависит от температуры.

Большое значение для дальнейшего развития теории теплоты имели начатые Рихманом в том же 1744 году и опубликованные в 1750 и 1758 гг. исследования процесса охлаждения жидкостей и твердых тел. Закон охлаждения тел был открыт Ньютоном в 1701 году. В результате большой экспериментальной работы Рихман пришел к выводу, что закон Ньютона лишь приблизительно выражает сущность явления и что в действительности закон охлаждения много сложнее, в особенности при нестационарных условиях в теле. Исследовав множество веществ, Рихман обратил внимание на то, что различные тела при одних и тех же условиях за одно и то же время охлаждаются неодинаково. Отсюда он сделал вывод, что «способность удерживать теплоту не зависит ни от соотношения между плотностями, сцеплением, твердостью, ни от всех их, вместе взятых»[1].

Рихману принадлежит целый ряд работ об испарении жидкостей. Он установил, что испарение сопровождается охлаждением испаряемой жидкости и что скорость испарения зависит от упругости пара и окружающего воздуха, от величины поверхности испаряемой жидкости, от скорости движения окружающего воздуха, а также от массы и высоты слоя воды в сосуде.

Рихман вначале был сторонником теплорода, однако в 50-е годы он вслед за Ломоносовым решительно перешел на позиции механической теории теплоты.

Работы Рихмана по теплоте получили к 50-м гг. XVIII в. широкую известность и в большой степени способствовали установлению в дальнейшем таких важных физических величин и понятий, как единица тепла (калория), теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, теплота испарения жидкостей.

К 1744—1745 гг. относится начало исследований Рихмана в области электричества. К этому времени накопился большой фактический материал в области электростатики. Уже существовала электростатическая машина, была изобретена лейденская банка — первый конденсатор электричества; известна была противоположность действия так называемых «стеклянного» (+) и «смоляного» (—) электричеств, явление стекания электрического заряда с острия; проводились первые опыты по электропроводности тел. Однако исследования электрических явлений в большинстве своем носили чисто качественный, описательный характер. Тем большей заслугой Рихмана явилось то, что он с первых своих опытов встал на путь количественного исследования «электрической силы». В 1745 году Рихман изобрел электроизмерительный прибор, который назвал «электрическим указателем». Этот прибор состоял из металличе-

[1] Рихман Г. В. Труды по физике. М., 1955, стр. 126.

ской линейки, свободно висящей вдоль нее льняной нити и дуговой шкалы, разделенной на градусы. Заряд сообщался линейке и измерялся углом отклонения нити, вес которой во всех опытах был одинаковым. На принципе прибора Рихмана основано устройство современного относительного электрометра. В современном абсолютном электрометре — приборе, измеряющем электрический заряд в абсолютных единицах, получил свое развитие принцип другого изобретения Рихмана (1745 г.) — прибора для измерения электрического заряда с помощью весов (в этом приборе электростатическое притяжение одной чаши весов к наэлектризованной металлической плите уравновешивается грузом на другой чаше). Эта идея была использована позже многими учеными (В. Томсон, Кирхгоф и др.).

Рихману принадлежит заслуга открытия электростатической индукции, т. е. явления электризации тел на расстоянии (мысль об этом впервые высказал Бойль). Им был установлен также факт электризации металлов от трения.

Узнав летом 1752 года о работах Франклина по атмосферному электричеству, Рихман занялся исследованием грозовых разрядов. При помощи сконструированных им совместно с Ломоносовым так называемых «громовых машин» — электроскопов, улавливавших электрический заряд из атмосферы и передававших его по металлическому стержню в лабораторию, Рихман подтвердил тождество «электрической материи» с «громовою материей». В 1752 году он для увеличения действия «громовой машины» соединил ее с лейденской банкой.

Рихман видел в изучении молнии задачу большого государственного значения, сам разрабатывал конструкцию молниеотводов и призывал к этому других ученых.

Опыты Рихмана и Ломоносова в области атмосферного электричества вызвали большой интерес в России. Сообщения о них регулярно печатались в «Санкт-Петербургских ведомостях». 6 сентября 1753 года должен был состояться на публичном собрании Академии наук отчет об этих исследованиях.

Но 6 августа 1753 года Рихман, приблизившись к своей «громовой машине», был убит разрядом электричества.

Внезапная смерть Рихмана произвела большое впечатление в России и на Западе. Тяжело переживал гибель своего друга Ломоносов. Пресекая всякие измышления о «божьем наказании» и т. п., Ломоносов писал в 1753 году о Рихмане: «...оных людей, которые бедственными трудами или паче исполинскою смелостию тайны естественные испытать тщатся, не подлежит почитать продерзкими, но мужественными и великодушными... Итак, не думаю, чтобы внезапным поражением нашего Рихмана натуру испытающие умы устрашились и электрической силы в воздухе законы изведывать перестали, но паче уповаю, что все свое рачение на то положат, с пристойною осторожностию, дабы открылось, коим образом здравие человеческое от оных смертоносных ударов могло быть покрыто» [1].

[1] Ломоносов М. В. Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих.—Полное собрание сочинений. Т. 3. М.—Л., Акад. наук СССР, 1952, стр. 23.

«Умер господин Рихман прекрасною смертью, исполняя по своей профессии должность,— писал Ломоносов.— Память его никогда не умолкнет» [1].

ТРУДЫ Г.-В. РИХМАНА

Рихман Г.-В. Труды по физике. (Подготовка текста, вступит. статья, примеч. и ред. А. А. Елисеева, В. П. Зубова, А. М. Мурзина. Ред. тома А. Т. Григорьян). М., Акад. наук СССР, 1956. 711 стр., илл. с портр. (Акад. наук СССР. Ин-т истории естествознания и техники).

В том включены разнообразные работы Рихмана, выполненные им в последние десять лет его жизни: труды по калориметрии и термометрии, теплообмену, испарению жидкостей и метеорологическим приборам, электричеству, магнетизму, исследованию упругих свойств воздуха, по механике, оптике и др. Включена также научная переписка Рихмана, его научные отчеты. Всего в томе 95 работ, 64 из них публикуются впервые; 89 работ впервые печатаются в русском переводе. Переводы с латинских рукописей выполнены В. П. Зубовым и А. И. Доватуром, с немецких —Т. Н. Кладо и Т. И. Коншиной.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г.-В. РИХМАНА

Рихман Георг-Вильгельм (1711—1753).— БСЭ, 2-е изд., т. 36, 1955, стр. 560, портр.

* *
*

Ломоносов М. В. Сочинения. Т. 8. Под ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 129—131 и др. (см. указатель личных имен).

Страницы, посвященные Г.-В. Рихману.

Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 1, 2, 3. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950—1952 (по указателю имен в каждом томе).

Упоминания о Г.-В. Рихмане.

М. В. Ломоносов о смерти Г.-В. Рихмана.—В кн.: Рихман Г.-В. Труды по физике. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 545—550.

Письмо И. И. Шувалову 26 июля 1753 г.— Из «Слова о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих».

* *
*

Степанов Б. Георг-Вильгельм Рихман (1711—1753).— «Наука и жизнь», 1938, № 11—12, стр. 93—96.

Радовский М. И. Рихман. (Первый русский исследователь в области электричества).— «Физика в школе», 1940, № 3, стр. 5—11.

Голоушкин В. Н. Георг Рихман.— «Физика в школе», 1953, № 5, стр. 15—21.

Популярные очерки жизни и деятельности.

Радовский М. И. Рихман, сподвижник Ломоносова.—«Электричество», 1940, № 3, стр. 67—70.

---

[1] Ломоносов М. В. Сочинения. Т. 8. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 131.

Елисеев А. А. и **Мурзин А. М.** Выдающийся русский физик XVIII века.—«Известия Акад. наук СССР. Отд-ние техн. наук», 1953, № 8, стр. 1166—1174, портр.

Кравец Т. П. и **Радовский М. И.** К 200-летию со дня смерти академика Г. В. Рихмана.— «Успехи физ. наук». 1953, т. 51, вып. 2, стр. 287—299, портр.

Дорфман Я. Г. Выдающийся русский физик Г.-В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве.— «Электричество», 1953, № 8, стр. 61—67, илл.

Мурзин А. М. Замечательный русский ученый Г.-В. Рихман и его труды по теплофизике.— «Котлотурбостроение», 1953, № 6, стр. 1—6, портр.

Зубов В. П. Калориметрическая формула Рихмана и ее предыстория.— Труды Ин-та истории естествознания и техники [Акад. наук СССР], 1955, т. 5, стр. 69—93.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юнош. лит., 1937, стр. 254—263.

Извлечения из работ Рихмана, описание его опытов по атмосферному электричеству, опубликованное в «Петербургских ведомостях» за 1752 год, описание сконструированного им «электрического указателя» и др.

Лебедев В. И. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 55—60.

Глава: Опыты Рихмана и Ломоносова по атмосферному электричеству.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 294—295, 304.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 319—323, 340, 344—345.

История естествознания в России. Т. 1, ч. 1, стр. 319—322.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 131, 244.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 112, 124—127, 129—130, 137.

* *
*

Пекарский П. П. История императорской Академии наук в Петербурге. Т. 1. Спб., 1870, стр. 697—717.

Жизнеописание Г.-В. Рихмана, его деятельность в Академии наук.

Несколько страниц посвящено Рихману также во втором томе этого труда: 408, 508, 516—518 и др.

Бобынин В. В. Рихман Георг-Вильгельм. Русский биографический словарь. Том: Рейтерн-Рольцберг. Спб., 1913, стр. 233—240.

ФРАНЦ-УЛЬРИХ-ТЕОДОР ЭПИНУС

(1724—1802)

Франц-Ульрих-Теодор Эпинус родился 13 декабря 1724 года в г. Ростоке (Северная Германия).

В Ростокском и Иенском университетах Эпинус получил математическое и медицинское образование. До 1755 года он занимал должность приват-доцента при Ростокском университете, а затем стал профессором астрономии в Берлинской академии наук, где в эти годы работал и знаменитый Эйлер. В 1757 году благодаря похвальному отзыву Эйлера и содействию русских академиков С. Я. Румовского и С. К. Котельникова Эпинус получил приглашение занять вакантное со дня гибели Рихмана место профессора физики в Петербургской академии наук, которая в 50-е годы сильно выросла в научном отношении и располагала хорошо оборудованными химической лабораторией и физическим кабинетом.

В России Эпинус весьма плодотворно занимался математикой, астрономией, метеорологией и главным образом физикой.

Основным научным трудом Эпинуса является трактат «Опыт теории электричества и магнетизма» (Спб., 1759 г.). Это сочинение содержит много ценных экспериментальных данных и одну из наиболее ранних попыток построить математическую теорию электрических и магнитных явлений.

К концу первой половины XVIII века, после полуторавекового перерыва (см. очерк о Гильберте) были вновь высказаны смутные догадки о сходстве электричества и магнетизма. Эпинусу принадлежит заслуга первого глубокого экспериментального и теоретического исследования этого вопроса. В результате многочисленных опытов с различными веществами он открыл так называемое пироэлектрическое явление в кристалле турмалина, т. е. явление возникновения электрического заряда на поверхности диэлектрика при равномерном его нагревании. На одном конце кри-

сталла возникал при этом положительный электрический заряд, на другом — отрицательный, что напоминало противоположные полюсы магнита. В то же время Эпинус наблюдал и явно электрические свойства турмалина — электризацию его трением, электризацию других тел при соприкосновении с нагретым турмалином. Эти опыты с турмалином и привели Эпинуса к выводу о сходстве электричества и магнетизма.

«При виде столь большого соответствия,— писал он,— возможно ли удержаться от мысли, что природа, быть может, пользуется одинаковыми средствами для создания явлений электричества и магнетизма». И далее: «Другие изыскания настолько утвердили меня в моем мнении, что я считаю его почти достоверным» [1].

Идея сходства между электричеством и магнетизмом, впервые четко высказанная Эпинусом, стала одной из основных идей при построении им его теории.

В основу теории электричества и магнетизма Эпинус вслед за Франклином положил представление о единой электрической (и магнитной) жидкости, недостаток или избыток которой в теле проявляется в его электризации (намагниченности). Вторым основным положением теории Эпинуса было представление о существовании в природе специфических «отталкивательных» и «притягивательных» сил, которые проявляются в ньютоновском тяготении, а также в притяжении и отталкивании наэлектризованных и намагниченных тел. При этом Эпинус отказался «от исследования вопроса, откуда происходят первоначальные силы». В «Введении» к трактату, разъясняя свою точку зрения, Эпинус подчеркивал: «...я отнюдь не считаю их (силы. — *С. Е.*), как поступают некоторые неосторожные исследователи великого Ньютона, силами, внутренне присущими телам, и я не одобряю учения, которое постулирует действие на расстоянии». И далее: «...мой взгляд сводится к тому, что притяжения и отталкивания, о которых я говорил, я считаю явлениями, причины которых еще скрыты» [2].

В 1759 году Эпинус высказал предположение о существовании квадратичной зависимости сил взаимодействия наэлектризованных тел от расстояния между ними.

Исходя из гипотезы электрической и магнитной жидкостей, Эпинус впервые объяснил явления электростатической и магнитной индукции. «...Ни одно тело,— писал он,— находящееся в естественном состоянии, не может приблизиться к другому телу, будь оно положительно-электрическим или отрицательно-электрическим, без того, чтобы и оно само не вышло из естественного состояния и не стало электрическим» [3]. Эпинус указывал также, что индукция проявляется сильнее в тех телах, в которых электрическая или магнитная жидкость перемещается свободнее (т. е. в проводниках).

---

[1] Эпинус Ф.-У.-Т. Теория электричества и магнетизма. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 429.

[2] Там же, стр. 22.

[3] Там же, стр. 55.

Строя свою теорию магнитных взаимодействий аналогично теории взаимодействий электрических, Эпинус вместе с тем подчеркивал и разницу между этими явлениями. Так, он отмечал, что нет «магнитных проводников».

Считая на основании своих опытов, что магнитная и электрическая жидкости стремятся к равномерному распределению в теле, Эпинус пришел к ошибочному выводу о невозможности наэлектризовать хороший проводник. (Еще в 40-е годы XVIII в. Рихману впервые удалось наэлектризовать металл трением).

Теория электричества и магнетизма Эпинуса получила в конце XVIII—начале XIX вв. широкое распространение. Эпинус впервые использовал в этой области физики язык механики Ньютона, рассматривая магнитные полюсы и электрические заряды как центры «отталкивательных» и «притягивательных» сил. Именно действием этих сил Эпинус считал возможным объяснить все электрические и магнитные явления. Метод, предложенный Эпинусом, оказался чрезвычайно плодотворным и господствовал в физике вплоть до появления теории электромагнитного поля Фарадея — Максвелла.

В процессе экспериментальных исследований электричества Эпинус вплотную подошел к важнейшим в электростатике понятиям — емкости и потенциала. Излагая свои опыты с конденсатором, он писал в своем трактате: «...легко можно показать, что если пластина (между обкладками конденсатора. — *С. Е.*) будет тоньше, то при прочих равных условиях возможно накопление электричества бо́льшее, чем если она имеет бо́льшую толщину...» И далее: «...сила электрического потрясения (разряда. — *С. Е.*) зависит, главным образом, от степени сгущения [1] электрической жидкости» [2].

Вместе со своим учеником И. К. Вильке Эпинус пришел к идее электрофорной машины, которая была изобретена позднее, в 1775 году Вольта. Последний писал об этом: «Эпинус и Вильке предвосхитили эту идею и открыли явление, хотя и не сконструировали законченного лабораторного прибора» [3].

Помимо исследований в области электричества, Эпинус многие годы занимался конструированием микроскопов. В 1784 году он изобрел первый в мире ахроматический микроскоп, отличавшийся высокими оптическими качествами.

С середины 60-х годов Эпинус в основном отошел от научной деятельности и вскоре по поручению Екатерины II занялся организацией в России системы народного просвещения, в чем сыграл видную роль.

С 1798 года, удалившись от дел, Эпинус поселился в Юрьеве (Тарту), где и скончался 22 августа 1802 года.

Материалов об Эпинусе сохранилось мало. До сих пор не найдено ни одного портрета ученого.

---

[1] Эта величина (выражаясь современным языком, величина заряда на обкладках) для случая конденсатора пропорциональна потенциалу.

[2] Эпинус Ф.-У.-Т. Теория электричества и магнетизма. М.—Л., 1951, стр. 70—71.

[3] Там же, стр. 506.

ТРУДЫ Ф.-У.-Т. ЭПИНУСА

Эпинус Ф.-У.-Т. Теория электричества и магнетизма. Ред. и примеч. проф. Я. Г. Дорфмана. М.—Л., 1951. 564 стр. с илл.; 2 л. илл. (Акад. наук СССР. Классики науки).

Основным содержанием книги является впервые переведенный на русский язык (проф. С. Я. Лурье) капитальный труд Ф. Эпинуса «Опыт теории электричества и магнетизма с приложением двух диссертаций, из коих первая объясняет некоторое электрическое, а вторая некоторое магнитное явление». На латинском языке труд был опубликован в 1759 году. Кроме этого труда, в книгу включены следующие работы Эпинуса: «Речь о сходстве электрической силы с магнитною», произнесенная в 1758 году в Петербургской академии наук и опубликованная на русском, латинском, французском и немецком языках в 1759—1760 гг.; «Мемуар, содержащий точное описание опытов, проведенных с турмалином» и «Дополнение к предыдущему мемуару», впервые опубликованные в Петербурге на французском языке в 1762 году. В приложениях к книге: примечания и «Библиографический указатель трудов Ф.-У.-Т. Эпинуса и материалов о его жизни и деятельности».

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Ф.-У.-Т. ЭПИНУСА

Эпинус Франц-Ульрих-Теодор (1724—1802).— БСЭ, 2-е изд., т. 49, 1957, стр. 127—128.

Радовский М. И. Исследования Эпинуса в области электромагнетизма. (1724—1802).— «Электричество», 1940, № 9, стр. 67—70.

Дорфман Я. Г. Эпинус и его трактат о теории электричества и магнетизма.— В кн.: Эпинус Ф.-У.-Т. Теория электричества и магнетизма. :М.—Л.', Акад. наук СССР, 1951, стр. 461—538.

Наиболее полный очерк творческого пути Эпинуса. История создания его капитального труда «Опыт теории электричества и магнетизма». Важнейшие идеи, высказанные и обоснованные Эпинусом в этом труде. Значение «Опыта теории» в истории науки.

Соболь С. Л. История микроскопа и микроскопических исследований в России в XVIII веке. М.—Л., Акад. наук СССР, 1949, стр. 230—234 и 331—354.

Описание изобретенных и усовершенствованных Эпинусом микроскопов.

* *
*

Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. науч.-попул. и юнош. лит., 1937, стр. 278—282.

Краткая биографическая справка о Ф. Эпинусе, выдержки из его работ: «Речь о сходстве электрической силы с магнитною» и «Опыт теории электричества и магнетизма».

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 350—353.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 341—343.

История естествознания в России. Т. 1, ч. I, стр. 347—348.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 179, 225, 239—240.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 271—273.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 35—36, 180.

* *
*

Биографические сведения об Эпинусе приводятся в известном труде: **Пекарский П. П.** История имп. Академии наук в Петербурге. Т. 2. Спб., 1870, стр. 696—703, 730—734, 956—960.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Библиографический указатель трудов Ф.-У.-Т. Эпинуса и материалов о его жизни и деятельности.— В кн.: Эпинус Ф.-У.-Т. Теория электричества и магнетизма. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 557—559.

ГЕНРИ КЕВЕНДИШ

(1731—1810)

Знаменитый английский физик и химик Генри Кевендиш родился 10 октября 1731 года в Ницце в семье лорда. Возможно, отчасти под влиянием отца, хорошего экспериментатора, увлекавшегося метеорологией, Кевендиш с ранних лет полюбил естественные науки. С годами интерес к научным занятиям стал основным в его жизни.

Несмотря на свое огромное состояние и высокое общественное положение, Кевендиш всегда оставался скромным человеком и свои большие средства тратил главным образом на научные опыты и помощь молодым ученым. Он работал в своей усадьбе и обычно был так поглощен исследованиями, что, по рассказам, для сбережения времени объяснялся с домашними раз навсегда установленными знаками. Кевендиш был членом Лондонского королевского общества, а также членом Парижской академии наук.

Научную деятельность Кевендиш начал с исследований химических свойств газов и сделал в этой области ряд крупных открытий. В 1766 году он первый занялся изучением газа, выделяющегося при действии соляной или слабой серной кислоты на цинк или железо и названного позже водородом (Кевендиш называл его «горючим воздухом»). Он впервые определил удельный вес водорода. Эти исследования Кевендиша оказали самое непосредственное влияние на развитие современной ему техники воздухоплавания (в 1783 году французский физик Ж. Шарль впервые стал наполнять аэростаты водородом, получая его действием соляной кислоты на железо). В том же 1766 году Кевендиш получил в чистом виде углекислый газ и определил его удельный вес. В начале 80-х годов он вновь занялся исследованием газов. Он проделал (1783—1789 гг.) ряд опытов по соединению различных газов путем пропускания через их смесь электрической искры и таким путем в 1781—1782 гг. открыл сложный химический состав воды, считавшейся до этого простым телом. Позднее, в 1785 году, количественный химический состав воды был уточнен

Лавуазье и Мёнье. С другой стороны, Кевендиш уточнил полученный ранее результат Лавуазье, определив в 1781 году процентное содержание кислорода в атмосферном воздухе (20,83%, что лишь немного отличается от современного — 20,93%).

Важнейшие открытия принадлежат Кевендишу в области электростатики. В середине XVIII века уже высказывалось предположение о квадратичной зависимости силы электростатических взаимодействий от расстояния между заряженными телами (Эпинус). Известный английский химик Пристли, исходя из законов механики, указал, что существованием такой зависимости можно объяснить опыт Франклина, при котором пробковый шарик, будучи помещенным внутрь заряженной сферы, оставался незаряженным.

Однако до Кевендиша никто не производил точных измерений с целью окончательно выяснить закон электростатических взаимодействий. Кевендиш в 1771 году впервые произвел расчет электростатических сил для опыта Франклина и доказал, что результат этого опыта действительно может быть объяснен только существованием обратно пропорциональной зависимости между силой электрического притяжения (отталкивания) и квадратом расстояния между взаимодействующими зарядами, так как только при этом условии действия всех частей заряженной сферы на шарик компенсируют друг друга. В 1773 году, несколько видоизменив опыт Франклина, Кевендиш путем точного количественного эксперимента нашел значение для степени расстояния, равное $2 \pm 1/50$. Опыт Кевендиша позволяет (в зависимости от техники измерения) определить результат с очень высокой точностью. Повторив его через столетие, Максвелл получил для показателя степени значение $2 \pm 1/2160$, т. е. определил его с точностью до 0,025%.

Таким образом, Кевендиш в 1771—1773 гг. первый установил основной закон электростатики — закон взаимодействия неподвижных зарядов. К сожалению, он не печатал своих работ по электричеству. В течение более 100 лет они пролежали в виде рукописей в библиотеке Кембриджского университета, оставаясь совершенно не известными науке. Лишь в 1879 году Максвелл изучил и опубликовал эти материалы. К этому времени открытый Кевендишем закон уже был известен и справедливо носил имя Кулона, экспериментально установившего этот закон в 1785 году, через 12 лет после Кевендиша.

Важной заслугой Кевендиша в области электростатики является открытие им в 70-е годы (за 65 лет до аналогичного открытия Фарадея) влияния диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора, на емкость конденсатора. Кевендиш впервые вычислил также величину диэлектрической постоянной для ряда веществ.

Само явление электричества он пытался объяснить существованием особого «эластичного» электрического флюида (невесомой жидкости).

В эти же годы и позднее Кевендиш занимался расчетом метеорологических приборов, усовершенствовал прибор для анализа химического состава газов—эвдиометр [1] и проделал с его помощью ряд опытов (опуб-

[1] Изобретен Вольта.



Генри Кевендиш

Несколько фактов, относящихся к деятельности Кевендиша в области электричества, приводятся в докладе академика П. Л. Капицы на торжественном заседании, посвященном 250-летию со дня рождения Франклина:

Капица П. Л. Научная деятельность В. Франклина.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 2, стр. 70—71.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 352, 375—376.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 308—310; Т. 2. стр. 256—257, 310.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 82, 94, 101.

ликованы в 1783 г.), решал важные проблемы мореходной астрономии и вопросы, связанные с конструкцией астрономических инструментов.

В 1798 году Кевендиш осуществил свой знаменитый опыт с крутильными весами, который явился первым блестящим экспериментальным подтверждением действия на Земле закона всемирного тяготения Ньютона. Другие исследователи пытались проверить действие этого закона на Земле путем сравнения силы, с которой данное тело притягивается Землей (т. е. веса тела), и силы притяжения этого тела какой-либо горой. Необходимость определять при этом массу горы сильно усложняла задачу. Кроме того, форма горы, далекая от шаровидной, неправильное распределение в ней плотностей делали весь опыт весьма приближенным с самого начала, так как закон Ньютона справедлив лишь для тел со сферическим распределением плотности.

В отличие от этих исследователей Кевендиш сравнивал вес свинцового шарика (т. е. притяжение его Землей) с притяжением его другим, значительно более массивным свинцовым шаром.

Таким образом, в опыте Кевендиша впервые были воспроизведены условия, в которых должен точно проявляться закон всемирного тяготения.

Сила взаимного притяжения свинцовых шаров измерялась с очень большой точностью при помощи крутильных весов. Маленький свинцовый шарик, укрепленный на одном конце коромысла весов, притягиваясь к большому шару, закрепленному неподвижно, закручивал упругую нить весов. По величине угла поворота нити вычислялась сила взаимодействия шаров. В этом опыте Кевендиш не только подтвердил действие закона всемирного тяготения на Земле, но и впервые измерил входящую в формулу этого закона гравитационную постоянную, а также определил среднюю плотность Земли. Полученные Кевендишем результаты оказались весьма близкими к современным. Так, для плотности Земли он получил значение 5,448 *г/см*^{3} (по современным данным она равна 5,52 *г/см*^{3}).

Все свои работы, за исключением работ по электричеству, Кэвендиш публиковал в ведущем английском научном журнале его времени — „Philosophical Transactions".

Умер Генри Кевендиш 24 февраля 1810 года в Лондоне.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г. КЕВЕНДИША

Кевендиш Генри (1731—1810).—БСЭ, 2-е изд., т. 19, 1953, стр. 244.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. I. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1929, стр. 114—116.

Краткий обзор жизни и творчества Кевендиша читатель найдет в статье, посвященной в основном характеристике его работ в области химии:

Яффе Б. Генри Кевендиш. — «Химия в школе», 1938, № 4, стр. 73—81, портр.

ШАРЛЬ ОГЮСТЕН КУЛОН

(1736—1806)

Французский физик и инженер Шарль Огюстен Кулон родился 14 июня 1736 года. Он получил образование в Париже, после чего в течение нескольких лет служил в армии в чине подполковника инженерных войск — сначала на острове Мартиника (Малые Антильские острова), а затем в самой Франции. Позднее, уже будучи известным ученым, Кулон некоторое время был генерал-инспектором министерства народного просвещения. С 1789 года он оставляет службу и отдается целиком занятиям наукой.

Научные исследования Кулон начал еще в годы службы в армии Внимание его особенно привлекали прикладная механика, электричество и магнетизм. С этими областями физики были связаны наиболее злободневные научные и технические проблемы во второй половине XVIII века.

Первый период научной деятельности Кулона (1773—1784 гг.) связан главным образом с вопросами прикладной механики. Его первая работа (1773) посвящена «некоторым проблемам статики, относящимся к архитектуре». В 1777 году в связи с объявленным Парижской академией наук конкурсом на лучшую конструкцию компаса Кулон представил свое второе сочинение — о магнитах. Анализируя различные способы укрепления на острие подвижной стрелки компаса, он обстоятельно исследовал явления кручения и трения. Вскоре после сочинения о магнитах появилась его работа по теории простых машин. Эти труды принесли Кулону широкую известность в ученом мире и были удостоены премии Парижской академии наук, а сам автор был избран в 1782 году адъюнктом академии. Продолжая исследования по механике, Кулон в 1784 году опубликовал свое основное сочинение в этой области — «Теоретические и экспериментальные исследования силы кручения и упругости металлических проволок». В этой работе он описал открытую им зависимость момента силы кручения от диаметра и длины проволоки, от угла закручивания ее и от



Шарль Огюстен Кулон

в непроводниках — по всей массе тела. Всего за период 1785—1788 гг. им было опубликовано шесть мемуаров по электричеству.

Изучение магнетизма Кулон начал еще в 1777 году. В сочинении о магнитных стрелках он исследовал, в частности, зависимость свойств магнитов от температуры. В этой же работе Кулон впервые высказал мысль о том, что притяжение и отталкивание между магнитами скорее могут быть объяснены силами, подобными силе всемирного тяготения, чем вихревым движением потоков особых материальных частиц вокруг и внутри магнитов, как это представляли себе картезианцы. Исследования по магнетизму Кулон изложил в ряде мемуаров, выходивших в разные годы, начиная с 1777 и до 1806 года. Уже незадолго до смерти, в 1802 году, Кулон пытался исследовать действие магнитов на немагнитные тела, но эти опыты не дали определенных результатов.

Основным трудом Кулона в этой области является мемуар «О магнетизме» (1789 г.), где он изложил свою оригинальную теорию магнетизма. Он распространил на магнитные явления представления о двух жидкостях, подобных электрическим. Однако, в противоположность электрическим жидкостям, магнитные жидкости, по теории Кулона, сосредоточены в молекулах вещества и не могут переходить из одной молекулы в другую. Этим Кулон объяснял невозможность получить изолированный магнитный полюс — северный или южный, как бы мелко ни дробить намагниченное тело. В мемуаре 1789 года Кулон установил закон взаимодействия «магнитных зарядов», совершенно аналогичный закону для электрических взаимодействий.

Открытие Кулоном точных законов взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов положило начало широкому использованию математических методов в исследованиях электрических и магнитных явлений и повело к глубокой разработке теории электричества и магнетизма. Оно дало программу действия в области электричества и магнетизма для целого поколения физиков. Более того, сходство закона Кулона и закона всемирного тяготения Ньютона наводило на мысль о возможности существования общего элементарного закона, охватывающего все физические явления в природе. Над поисками такого закона упорно бились физики XIX и первой половины XX столетия. Однако стремление описать все явления природы с помощью одного универсального закона, свести их к одному виду явлений — к механическим движениям или к электромагнитным процессам — все эти попытки не имели успеха. Открытие ядерных сил и взаимодействий свидетельствует о том, что между этими взаимодействиями и взаимодействиями, известными ранее, существуют глубочайшие качественные отличия, и поэтому одни несводимы к другим.

Большую роль в физических исследованиях сыграли крутильные весы Кулона. Ими пользовался Ом при установлении законов электрического тока; с помощью крутильных весов П. Н. Лебедев впервые измерил давление света на газы.

Кулон умер 23 августа 1806 года. Именем Кулона названа единица количества электричества, служащая для измерения электрического за-

некоторой постоянной величины, зависящей от физических свойств вещества проволоки и названной позднее модулем Кулона.

В работе 1784 года Кулон рассмотрел и другой, чрезвычайно важный вопрос — вопрос о способе измерения малых сил разнообразной природы: сил трения между твердым телом и жидкостью, электрических, магнитных сил и др. Для измерения малых сил Кулон предложил использовать крутильные весы. Сущность их действия заключается в том, что висящее на тонкой нити подвижное коромысло с шариком и противовесом на концах при действии на шарик весьма малой силы (в горизонтальной плоскости) поворачивается и закручивает при этом нить — на угол, пропорциональный действующей силе.

С помощью этого изобретения Кулон осуществил свои знаменитые количественные исследования электрических и магнитных взаимодействий.

Еще начиная с Гильберта (см.), многие физики пытались исследовать эти явления с количественной стороны. Для этого изобретались различные электроизмерительные приборы, появление которых связано с именами Гильберта, Грея, Дюфэ, Рихмана, Ломоносова. Неоднократно делались также попытки измерить взаимодействия магнитов (Мушенбрёк, Дюфэ, Крафт и др.). Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения явилось новым стимулом для этих измерений, так как наводило на мысль об аналогии между взаимодействием незаряженных материальных частиц и взаимодействием наэлектризованных или намагниченных тел. В 1750 году английский физик Майчелл (1724—1793) высказал правильную мысль о зависимости силы взаимодействия магнитов от расстояния. В 1773 году другой английский физик—Кевендиш (см.) экспериментально установил закон взаимодействия наэлектризованных тел. Но труды Кевендища по электричеству более ста лет, до опубликования их в 1879 году Максвеллом, лежали в библиотеке Кембриджского университета никому не известные. Результаты исследований других физиков не отличались достаточной определенностью, и ко времени начала исследований Кулона отыскание точного закона электрических и магнитных взаимодействий продолжало оставаться актуальной задачей физики.

В 1785 году в сочинении «Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения», Кулон сформулировал закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов, согласно которому два наэлектризованных шарика взаимодействуют с силой, прямо пропорциональной количествам электричества этих шариков и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

В ходе своих опытов над взаимодействием наэлектризованных тел Кулон исследовал и ряд других важных вопросов электростатики.

В 1785 году он открыл закон «стекания» (через окружающий воздух и опору) заряда с наэлектризованного тела.

В своих работах Кулон пользовался представлениями о двух электрических жидкостях — положительной и отрицательной. Исследовав распределение электрических жидкостей в телах, он в 1786 году установил, что в проводниках эти жидкости распределяются лишь на поверхности, а

ряда в практической системе единиц. В 1884 году Французским физическим обществом были изданы в виде отдельного тома все тридцать мемуаров Кулона.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Ш. О. КУЛОНА

Кулон Шарль Огюстен (1736—1806). — БСЭ, 2-е изд., т. 24, 1953, стр. 21, портр.

Бачинский А. Шарль Огюстен Кулон.— «Физика в школе», 1937, № 6, стр. 11—15.

Шарль Огюстен Кулон. 1736—1806. (К двухсотлетию со дня рождения).— «Наука и техника», 1936, № 14, стр. 15—16.

Лежнева О. А. Шарль Огюстен Кулон. (К 150-летию со дня смерти).— «Наука и жизнь», 1956, № 8, стр. 57.

Лежнева О. А. Труды Ш. О. Кулона в области электричества и магнетизма. (К 150-летию со дня смерти).— «Электричество», 1956, № 11, стр. 79—82.

Лежнева О. А. Жизнь и научная деятельность Шарля Огюстена Кулона. — «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 386—396.

* *
*

Лебедев В. И. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет лит., 1937, стр. 64—69.

Глава: Опыты Кулона.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 374—376.

Спасский Б. И. История физики. Ч. 1, стр. 347—349.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 133—134, 136.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 180—185, 255—260.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 2, стр. 298—299.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 36—41.

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского. М., Гостехиздат, 1957, стр. 62—70.

Биографические сведения о Кулоне и анализ его трудов по механике упругого тела. Автор книги, крупный специалист в области науки о сопротивлении материалов, дает весьма высокую оценку этим трудам Кулона, подчеркивая, что «...никто другой из ученых XVIII века не дал так много механике упругого тела, как Кулон» (стр. 64).



ЛУИДЖИ (АЛОИЗИЙ) ГАЛЬВАНИ

(1737—1798)

Итальянскому физиологу Гальвани принадлежит заслуга первого наблюдения и изучения электрохимических явлений. Сам Гальвани не сумел правильно объяснить эти явления — это сделал его выдающийся соотечественник и современник Вольта. Тем не менее заслуга Гальвани перед человечеством чрезвычайно велика. Своими работами он вызвал к жизни совершенно новую область физики— учение об электрическом токе.

Луиджи Гальвани родился 9 сентября 1737 года в Болонье — городе, славившемся своим университетом, основанным еще в XII веке. Окончив Болонский университет, Гальвани защитил докторскую диссертацию по анатомии и 25 лет получил звание профессора медицины. С 1775 года он занял в Болонском университете кафедру анатомии, а затем (с 1782 г.) — медицины. Лекции Гальвани, отличавшиеся точным и ясным языком, проходили с большим успехом. Кроме того, в родном городе он приобрел славу искусного хирурга и акушера.

Первые научные работы Гальвани были посвящены анатомии птиц.

Свои знаменитые исследования электрических явлений в мышцах и нервах животных Гальвани начал в 1780 году.

Во время физиологических опытов он и его ученики заметили однажды, что находившиеся вблизи электрофорной машины лапки препарированной лягушки судорожно подергивались всякий раз, как только при разряде машины к нервам лапок прикасались металлическим скальпелем. Заинтересовавшись этим явлением, Гальвани установил, что подергивание мышц и нервов происходило лишь в том случае, когда рука человека или очень длинная проволока прикасались к металлической части скальпеля или к гвоздикам в его костяной ручке. Подобное явление Гальвани наблюдал и при атмосферных разрядах: подвешенные к железному проводу лапки лягушек, к концам которых была присоединена длинная металли-

ческая проволока, опущенная в воду колодца, начинали судорожно подергиваться во время грозы, однако не реагировали на зарницы (далекие молнии).

Как теперь ясно, в этих опытах Гальвани один из первых наблюдал не что иное, как явление электромагнитной индукции — наведение тока в проводнике, помещенном в переменное магнитное поле (в первом случае — поле искры электрической машины, во втором — магнитное поле близкой молнии). Интересно отметить, что вся постановка опытов Гальвани — включение в цепь мышц лягушки, нервы которых служили по существу чувствительными индикаторами тока; соединение мышц лягушки с рукой человека, с длинной проволокой или (во втором опыте) с Землей (через воду колодца), иными словами, соединение их с большими резервуарами для оттока наведенных зарядов — все это создавало условия, в которых можно было отчетливо наблюдать явление электромагнитной индукции.

Тем не менее Гальвани прошел мимо этого явления. Он не сумел, да и не мог бы на современном ему уровне развития науки его объяснить.

Гальвани продолжил свои опыты в другом направлении: он добился движения мышц и нервов без электрофорной машины. Лапки препарированной лягушки подергивались всякий раз, как только их касались два разнородных металла, соединенные между собой. Причину этого явления Гальвани приписал особому «животному электричеству», существование которого он предположил в мышцах и нервах. Результаты своих исследований Гальвани опубликовал в 1791 году в своем основном труде — «Трактат о силах электричества при мышечном движении».

Опыты Гальвани вызвали сильнейший интерес в ученом мире. Множество физиков повторяли эти опыты. Одним из первых был Вольта, который вскоре высказал, однако, сомнение в правильности выводов Гальвани и предложил свою теорию явления, утверждая, что ток в опыте Гальвани возникал не за счет «животного» электричества, а в результате контакта между двумя разнородными металлами. Разгоревшаяся вокруг этого вопроса научная дискуссия, в которой приняли участие многие ученые, закончилась уже после смерти Гальвани изобретением первого гальванического элемента («вольтова столба») и торжеством теории Вольта (см.).

Между тем в ходе дискуссии Гальвани, твердо державшийся своих убеждений, доказал и существование животного электричества. Составив цепь лишь из частей препарированного животного (без включения металлических проводников) и пользуясь только специальными стеклянными ножами, он обнаружил в такой цепи электрический ток. Сам Гальвани ошибочно полагал, что опроверг этими опытами теорию Вольта. В действительности же Гальвани открыл новое явление, не связанное по существу с наблюдавшимся им прежде явлением подергивания лапок лягушки.

Установление Гальвани факта существования животного электричества положило начало электрофизиологии — науки, смежной с учением об электричестве и с физиологией, имеющей в настоящее время большое теоретическое и практическое значение.



Луиджи Гальвани

Последние годы жизни Гальвани были омрачены тяжелыми личными утратами, а также политическими событиями в Италии в связи с оккупацией страны войсками Наполеона.

Гальвани не желал присягать новому правительству и в 1797 году вынужден был покинуть Болонский университет. Учитывая большие научные заслуги ученого, ему через некоторое время предложили возвратиться в университет, но было уже поздно — 4 декабря [1] 1798 года Гальвани скончался.

Слава пришла к Гальвани лишь после смерти. В честь ученого в 1804 году были выбиты медали, а в 1814 году ему был поставлен памятник в его родном городе. Скромный итальянский физиолог получил и другое, несравненно более ценное признание: имя Гальвани прочно вошло в учение об электричестве и в важнейшие области техники, физиологии, медицины. С его именем связаны многие термины из этих областей — смысл их со времени Гальвани изменился, стал несравненно глубже, но в основе их лежит имя этого замечательного ученого, как и в основе учения об электрическом токе — его труды.

Литературу о жизни и деятельности А. Гальвани см. на стр. 138.

[1] По другим данным — 4 ноября 1798 г.

АЛЕССАНДРО ВОЛЬТА

(1745—1827)

Имя Вольта — итальянского физика и физиолога — стоит первым в ряду основоположников учения об электрическом токе. Вольта впервые правильно объяснил знаменитые опыты своего современника и соотечественника Гальвани и изобрел первый в мире длительный источник тока — гальваническую батарею («вольтов столб»), что сразу же позволило начать серьезные лабораторные исследования электрического тока и составило эпоху в истории физики. «Вольтов столб» был «самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины»,— писал в биографии Вольта известный французский физик Араго.

Алессандро Вольта родился 19[1] февраля 1745 года в богатой семье, принадлежавшей к старинной итальянской знати. Родиной Вольта был маленький городок Северной Италии — Комо.

Уже в школьные годы будущий знаменитый физик увлекался естественными науками. К 19 годам он даже написал поэму, посвященную новым открытиям в физике и химии. Вольта был захвачен начавшимся во второй половине XVIII века всеобщим увлечением опытами над электричеством. В 1769 году появилась в печати его первая научная работа — диссертация «О притягательной силе электрического огня», посвященная опытам с «лейденской банкой» — первым электрическим конденсатором, изобретенным в 1746 году голландским физиком Мушенбреком из Лейдена (1692—1761).

В 1774 году Вольта получил должность преподавателя физики в Комо, а с 1779 года стал профессором физики в университете г. Павии.

---

[1] По другим источникам 18 февраля.

К этим годам относится появление важных изобретений Вольта: оригинальной электрической машины — «смоляного электрофора» (1775 г.), прибора для анализа химического состава газов — эвдиометра (1777 г.), которым физики пользуются и в настоящее время, и др.

В 1781 году Вольта, не зная об аналогичных трудах Рихмана, изобрел чувствительный электроскоп с соломенными листочками, а в 1787 году соединил свой прибор с изобретенным им же (1782 г.) оригинальным электрическим конденсатором, что увеличивало чувствительность электроскопа.

Вольта поддерживал широкие научные связи и много путешествовал, чтобы ближе познакомиться со своими знаменитыми современниками. Он посетил в Швейцарии «властителя дум XVIII века» — Вольтера, в Англии — выдающегося английского химика и философа-материалиста Пристли, был лично знаком с Лапласом и Лавуазье, вел переписку с Франклином, посетил Голландию и Германию.

Знаменитые исследования электрического тока Вольта начал в 1792 году. Поводом к этому явилось опубликование в 1791 году сочинения Гальвани «Трактат о силах электричества при мышечном движении», который вызвал живейший интерес во всем научном мире.

Повторив опыты Гальвани, Вольта вначале согласился с его выводами. Он также склонен был думать, что электрический ток, возникающий в цепи, составленной из двух металлов и свежепрепарированных мышц и нервов лягушки, обязан своим появлением особому, «животному» электричеству. Однако, продолжив эти исследования, Вольта уже в 1793 году высказал сомнение в правильности выводов Гальвани. Он выдвинул свою так называемую контактную теорию явления, утверждая, что причиной возникновения электрического тока в мышцах и нервах препарированной лягушки является наличие двух соединенных между собою разнородных металлов, соприкасающихся в то же время с электропроводящей жидкостью животных тканей. Мышцы же и нервы, как правильно указал Вольта, играют в этих опытах лишь роль очень чувствительного электроскопа. Это положило начало знаменитому ученому спору между Гальвани и Вольта, который превратился в длительную дискуссию многих ученых и закончился к концу XVIII века торжеством теории Вольта.

Результаты своих работ Вольта изложил в 1792—1795 гг. во множестве писем к известным ученым того времени и в ряде статей. Впоследствии они вошли основной частью в собрании сочинений Вольта, изданные в 1816 и в 1918—1929 гг. (полное собрание) на итальянском языке. На русском языке основные работы Вольта по электричеству были изданы в 1937 году под общим названием «Письма и статьи о животном электричестве (1792—1795)» [1]. В последней из этих статей («Новая статья о животном электричестве», 1795 г.) Вольта сформулировал основные положения своей «контактной теории» электрического тока. «...Электрический флюид,— утверждал Вольта,— приводится в движение каждый раз, ...когда один или несколько непрерывных проводников...

[1] Русский перевод — в кн.: Гальвани А. и Вольта А. Избранные работы о животном электричестве. М.—Л., Биомедгиз, 1937.



Алессандро Вольта

второго класса имеются в виду так называемые «влажные проводники», например, животные ткани,— *С. Е.*) вводится между двумя проводниками («первого класса» — металлы.— *С. Е.*), отличными друг от друга и от тела, к которому они прилегают». При этом Вольта приписывал таким проводникам первого класса «свойство служить возбудителями или двигателями» (электрического тока.—*С. Е.*). «Та же самая способность,— писал далее Вольта,— присуща в значительно меньшей степени также и проводникам второго класса» [1].

Дальнейшее развитие науки показало, что контактная теория правильно объясняет возникновение кратковременного электрического тока в цепи из разнородных металлов (за счет так называемой контактной разности потенциалов). Однако объяснение на основе этой теории явления длительного электрического тока в гальванических элементах противоречит основному закону природы — закону сохранения энергии. На это отчетливо указал в первой половине XIX века Фарадей. В гальваническом элементе, как теперь известно, электрический ток течет не просто за счет контакта различных проводников, как считал в свое время Вольта, а за счет непрерывного превращения энергии химических реакций между электролитом и металлом в электрическую энергию.

Крупнейшим достижением Вольта было изобретение им в 1800 году «вольтова столба» — гальванической батареи. Первый «вольтов столб» состоял из 20 пар медных и цинковых кружков, разделенных суконными кружками, смоченными в соленой воде. Концы «столба» Вольта назвал полюсами. На одном из них обнаруживалось положительное, на другом— отрицательное электричество. Если полюсы соединяли проволокой, то в такой замкнутой электрической цепи возникал довольно сильный и длительный электрический ток. Получив таким образом электрический ток в цепи, составленной без участия животных тканей, Вольта окончательно доказал несостоятельность представлений сторонников «животного электричества», утверждавших, что в опытах Гальвани металл служил лишь разрядником, источником же тока было «животное» электричество.

О своем изобретении Вольта в письме от 20 марта 1800 года сообщил президенту Лондонского королевского общества Дж. Бенксу [2].

Весть об изобретении Вольта молниеносно облетела Европу. Последовавшие вслед за тем бесчисленные и разнообразные опыты с «вольтовым столбом» уже в первом десятилетии XIX века привели к целому ряду важнейших открытий. Знаменитый английский физик и химик Г. Дэви в процессе своих электрохимических исследований впервые сумел разложить едкие щелочи и получить металлический калий и натрий (1807 г.). В эти же годы Вольта объяснил замеченное незадолго перед тем явление так называемой гальванической поляризации элементов. В. В. Петров в

---

[1] Русский перевод — в кн.: Гальвани А. и Вольта А. Избранные работы о животном электричестве. М.—Л., Биомедгиз, 1937. Письмо третье — к итальянскому физику и математику А. М. Вассалли (1761—1825) от 27 октября 1795 г., стр. 413—414.

[2] Дж. Бенкс (1743—1820) — английский естествоиспытатель, с 1778 г. президент Лондонского королевского общества.

России (1802 г.), а позже независимо от него Дэви (1808 г.) получили знаменитую «вольтову дугу».

Вольта оказался счастливее многих других деятелей науки — труды его получили полное признание уже при жизни их автора. Еще в 1791 году он был избран в члены Лондонского королевского общества и получил от него золотую медаль Коплея. Многие иностранные академии, в том числе Петербургская, приглашали его к себе, но Вольта отказался покинуть Италию. После демонстрации «вольтова столба» в Париже (1801 г.) ученый был осыпан наградами и почестями. Во Французской академии наук была учреждена премия в 60 000 франков за работу по электричеству, сравнимую с достижениями Вольта и незадолго перед тем (1790 г.) скончавшегося Франклина. С 1815 года Вольта занимал пост директора философского факультета Падуанского университета.

После 1800 года он изучал электрическую возбудимость различных органов животных. Соединяя проволокой оловянный листок, положенный на глазное яблоко, с серебряной ложкой, взятой в рот, Вольта открыл, что при этом появляется ощущение света. Ему же принадлежит правильное объяснение обнаруженного шведским философом И.-Г. Зульцером (1752 г.) кислого и щелочного вкуса при прикосновении разнородных металлов к языку. Наиболее важной среди работ Вольта в эти годы было открытие так называемого «ряда напряжений» металлов — последовательности, в которой металлы располагаются по своей способности растворяться в электролите (будучи электродами гальванического элемента) и таким образом вытеснять из раствора другой металл [1]. Эта закономерность используется в мероприятиях по предохранению металлов от коррозии. Для этого предохраняемый металл контактно покрывают другим металлом, стоящим выше в ряду напряжений, до тех пор, пока последний не растворится, первый не будет тронут коррозией. В печати, однако, в эти годы не появилось больше ни одной работы Вольта.

В 1819 г. он оставил Падуанский университет и поселился в Комо. Последние годы жизни Вольта провел вдали от дел, окруженный славой и уважением.

Умер Вольта 5 марта 1827 года.

ТРУДЫ Л. ГАЛЬВАНИ И А. ВОЛЬТА

Гальвани Л. и **Вольта А.** Избранные работы о животном электричестве. Перевод, биографический очерк и примеч. проф. Е. Э. Гольденберга. Вступит. статья А. В. Лебединского. М.—Л., Биомедгиз, 1937. 430 стр. с илл.; 2 л. портр. (Всесоюз. ин-т эксперим. медицины. Классики биологии и медицины).

---

[1] В настоящее время «рядом напряжений» называют последовательность металлов, расположенных по величине потенциала, возникающего на границе электрод-электролит (так называемый электродный потенциал). «Ряд напряжений» отражает общие термодинамические свойства металлов, а не только их способность к растворению в некоторых определенных условиях.

В книгу вошли следующие работы:

Гальвани А. Трактат о силах электричества при мышечном движении (стр. 77—166). Примечания (стр. 417—422).

Вольта А. Письма и статьи о животном электричестве (стр. 169—414). Примечания (стр. 422—430).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Л. ГАЛЬВАНИ И А. ВОЛЬТА

Гольденберг Е. Э. Гальвани и Вольта. (Биографический очерк).— В кн.: Гальвани Л. и Вольта А. Избранные работы о животном электричестве. М.—Л., Биомедгиз, 1937, стр. 65—75.

Радовский М. И. Луиджи Гальвани и Александр Вольта. (К 150-летию открытия электрического тока).— «Сов. наука», 1941, № 1, стр. 118—129, портр.

Радовский М. И. Гальвани и Вольта. К 150-летию открытия тока. С предисл. акад. В. Ф. Миткевича. М.—Л., Госэнергоиздат, 1941. 92 стр., илл.

Лебедев В. И. Опыты Гальвани и Вольта.—В кн.: Лебедев В. Электричество, магнетизм в их историческом развитии. М.—Л., ОНТИ, Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 101—113.

Описание опытов дано в форме извлечений из трудов Гальвани и Вольта с необходимыми пояснениями и иллюстрациями. В книге приводится также письмо Вольта, представляющее собою первое его сообщение о сделанном им открытии «вольтова столба».

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 381—387.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, 264, 275—291.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 84—93, 116—118.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 171—184.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 187—191.

ЛИТЕРАТУРА О Л. ГАЛЬВАНИ

Гальвани, Луиджи (1737—1798).— БСЭ, 2-е изд., т. 10, 1952, стр. 161—163.

Бачинский А. Луиджи Гальвани.— «Физика в школе», 1937, № 3, стр. 3—4.

Аптекман М. Луиджи Гальвани.— «Вестник знания», 1937, № 9, стр. стр. 68—70.

Пермяков Ф. А. Луиджи Гальвани.— «Наука и жизнь», 1937, № 10, стр. 63—66, илл.

Плесков Ю. В. Луиджи Гальвани.— «Электричество», 1957, № 9, стр. 63—65.

Биография Гальвани, его опыты, взаимоотношения с Вольта. Гальвани — основоположник электрофизиологии.

ЛИТЕРАТУРА ОБ А. ВОЛЬТА

Вольта, Алессандро (1745—1827).— БСЭ, 2-е изд., т. 9, 1951, стр. 58, портр.

Орлов С. А. Алессандро Вольта (1745—1827).— «Наука и техника», 1937, № 15, стр. 9—10.

Лебединский В. К. Алессандро Вольта, 1745—1827.— «Электричество», 1927, № 9, стр. 289—292.

Бочарова М. Д. Алессандро Вольта. К 130-летию со дня смерти.— «Электричество», 1957, № 3, стр. 73—76.

* *
*

Араго Ф. Александр Вольта.— В кн.: Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Пер. Д. Перевощиков. Т. 2, Спб., 1860, стр. 199—234.

Как и другие биографии, содержащиеся в этой книге, биография А. Вольта написана с присущим Араго блеском и читается с живым интересом.

ВАСИЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ПЕТРОВ

(1761—1834)

Василий Владимирович Петров, замечательный физик-экспериментатор, основоположник электротехники в России, родился 19 июля 1761 года в г. Обояни (ныне Курской обл.) в семье приходского священника. Учился он сначала в церковной школе, затем в так называемом Харьковском коллегиуме и в учительской семинарии в Петербурге. Еще в семинарии Петров проявил больший интерес к физике и математике, а позже и к химии. Это глубокое увлечение наукой и незаурядные способности определили дальнейшую судьбу В. В. Петрова.

После двухлетней службы в качестве учителя физики и математики в горном училище г. Барнаула (на Алтае), где он зарекомендовал себя отличным педагогом, Петров в 1791 году возвратился в Петербург. Здесь в Главном Петербургском врачебном училище развернулась его яркая, плодотворная научная и педагогическая деятельность, длившаяся более 40 лет. С 1798 года, когда училище было преобразовано в Медико-хирургическую академию, и почти до самой смерти Петров возглавлял в ней кафедру физики (одновременно читая физику и в других учебных заведениях). Впервые в России он ввел практические лабораторные занятия для студентов. Ему принадлежит заслуга создания при Медико-хирургической академии физического кабинета, который стал крупнейшим по тому времени в России центром экспериментальной физики. Организация физического кабинета потребовала от Петрова много времени и труда. Физические приборы приходилось привозить из-за границы или приобретать у частных лиц. В качестве основного фонда в кабинет вошло редкое собрание приборов графа Д. П. Бутурлина, приобретенное у его наследников за 28 000 рублей и перевезенное Петровым в 1802 году из Москвы в Петербург. К концу деятельности Петрова в кабинете числилось 600 приборов, треть которых относилась к электричеству и магнетизму. Научные открытия самого Петрова были результатом большой экспериментальной работы, проведение которой оказалось возможным благодаря прекрасному оборудованию физического кабинета.

Придавая исключительно большое значение эксперименту в научной работе физика, в частности в области электричества, Петров писал: «...гораздо надежнее искать настоящего источника электрических явлений не в умствованиях, к которым доселе только прибегали почти все физики, но в непосредственных следствиях самых опытов»[1].

Круг научных интересов В. В. Петрова не ограничивался физикой. Своими трудами он внес значительный вклад и в химию. В 1797—1800 гг. рядом тщательно поставленных опытов Петров показал несостоятельность теории флогистона и подтвердил справедливость кислородной теории горения Лавуазье. В течение многих лет Петров занимался исследованиями люминесценции — явления холодного свечения, вызываемого различными физическими, химическими и биологическими факторами.

В частности, Петров установил различие между хемилюминесценцией (свечение тел за счет происходящих в них химических процессов) и фотолюминесценцией (свечение тел за счет энергии падающего на них света).

Однако наибольшее значение имеют физические исследования В. В. Петрова, именно его исследования в области электричества.

Основным научным трудом его является опубликованное в 1803 году «Известие о гальвани-вольтовских опытах посредством огромной баттереи, состоявшей иногда из 4 200 медных и цинковых кружков». В этом труде Петров описал проведенные им опыты по электричеству. Многие из них носили оригинальный характер. Сам Петров писал, что «прежде производства оных не случалось мне читать нигде известия», хотя он был широко осведомлен об успехах науки за границей.

В 1802 году в процессе опытов с упомянутой выше гальвани-вольтовской батареей Петров получил и первый всесторонне исследовал явление разряда при размыкании угольных электродов. Впоследствии это явление получило название «вольтовой дуги». В 1808 году вольтову дугу, независимо от Петрова, получил и описал знаменитый английский ученый Гемфри Дэви, которому долгое время ошибочно приписывалось первенство открытия этого явления. Следует отметить, что сам Дэви никогда не претендовал на это первенство. Открытие электрической дуги имело и продолжает иметь большое значение как в научных исследованиях, так и в технике. В частности, еще сам Петров указал на возможность использования электрической дуги для освещения, а также для плавки и сварки металлов.

Большие заслуги принадлежат Петрову и в других областях электричества. Он впервые проделал ряд успешных опытов по электролизу окислов металлов, растительных масел, алкоголя, воды; Петрову принадлежит изобретение способа изоляции проволочных проводников путем покрытия их сургучом.

Несмотря на то, что В. В. Петров состоял ординарным членом Петербургской академии наук (с 1815 г.) и членом Медико-хирургической ака-

---

[1] В. В. Петров. Новые электрические опыты. Спб., 1804, стр. 70.

демии (с 1809 г.), о научных трудах талантливого русского физика отечественные и тем более иностранные ученые знали очень немного. Его труды — научные мемуары и отдельные статьи — были разбросаны по разным журналам и напечатаны только на русском языке.

Неутомимая борьба за развитие физики в России привела Петрова к конфликту с реакционной верхушкой Академии, во главе которой стоял такой столп реакции, как С. С. Уваров. Петров был отстранен от руководства физическим кабинетом, а затем уволен в отставку с небольшой пенсией. 3 августа 1834 года он скончался.

Конференция Медико-хирургической академии ограничилась лишь пожеланием «приличным образом почтить память ревностнейшего из бывших ее членов». Но и оно осталось невыполненным. В течение многих десятилетий после смерти Петрова имя его и труды оставались забытыми. Не сохранилось ни одного его портрета. Только при Советской власти были по-настоящему оценены подлинные заслуги этого замечательного ученого. В ряде институтов были учреждены ежегодные премии имени В. В. Петрова за лучший дипломный проект на электротехническую тему. В 1936 году был переиздан основной труд Петрова — «Известие о гальвани-вольтовских опытах». Так сбылись слова Петрова, писавшего в свое время: «Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает».

ТРУДЫ В. В. ПЕТРОВА

Петров В. В. Известие о гальвани-вольтовских опытах, которые производил профессор физики Василий Петров, посредством огромной наипаче баттереи, состоявшей иногда из 4 200 медных и цинковых кружков, и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-хирургической академии. В Санкт-Петербурге, 1803 года.— В кн.: Сборник к столетию со дня смерти первого русского электротехника академика Василия Владимировича Петрова. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. энергет. лит., 1936, стр. I—VIII, 1—195.

Первое издание этого знаменитого труда вышло в 1803 году. Издание 1936 года представляет собою точное (фотомеханическое) воспроизведение издания 1803 года. В 1956 году труд этот был вновь переиздан в сборнике:

Петров В. В. Избранные труды по электричеству. Под ред. и с примеч. проф. Л. Д. Белькинда. М., Гостехиздат, 1956, стр. 11—94, 281—287.

Петров В. В. Новые електрические опыты профессора физики Василия Петрова, который оными доказывает, что изолированные металлы и люди, а премногие только нагретые тела могут соделываться електрическими от трения, наипаче же стегания их шерстью выделанных до нарочитой мягкости мехов и некоторыми другими телами; также особливые опыты, деланные различными способами для открытия причины електрических явлений. С грав. фиг. Спб., 1804. 352 стр.

Первые три главы этого труда также перепечатаны в сборнике:
Избранные труды по электричеству. Под ред. и с примеч. проф. Л. Д. Белькинда. М., Гостехиздат, 1956, стр. 95—142, 287—290.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ В. В. ПЕТРОВА

Белькинд Л. Д. и **Шнейберг Я. А.** Петров Василий Владимирович.— БСЭ, 2-е изд., т. 32, 1955, стр. 595—596.

Белькинд Л. Д. Василий Владимирович Петров. (1761—1834).— В кн.: Люди русской науки. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 83—89.

Шателен М. А. Василий Владимирович Петров. 1761—1834.—В кн.: Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955, стр. 30—52.

Елисеев А. А. Жизнь и творчество В. В. Петрова. — В кн.: Петров В. В. Избранные труды по электричеству. М., Гостехиздат, 1956, стр. 221—238.

Кудрявцев Б. Б. Василий Владимирович Петров. Его жизнь и деятельность. М., Гостехиздат, 1952. 95 стр. с илл. (Люди русской науки).

В книге излагается содержание основных работ В. В. Петрова в области электротехники и физической химии, характеризуется их значение в истории науки. Отдельные главы посвящены организации Петровым преподавания опытной физики, его деятельности в Академии наук. Имеются сведения об учениках Петрова.

Елисеев А. А. Василий Владимирович Петров. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949. 180 стр. с илл.

Наиболее крупная биография В. В. Петрова. Широко освещена его педагогическая и научная деятельность, его исследования в области электричества, люминесценции, метеорологии, гидрологии. Много места занимают извлечения из научных трудов Петрова, позволяющие читателю проникнуть в творческую лабораторию ученого.

* *
*

Сборник к 100-летию со дня смерти первого русского электротехника академика Василия Владимировича Петрова. (1761—1834). М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. энергет. лит., 1936. 196, XXXVI стр.

Основным содержанием сборника является переизданный мемуар В. В. Петрова «Известие о гальвани-вольтовских опытах». Помимо биографического очерка «Василий Владимирович Петров» (автор Л. Д. Белькинд), в сборнике воспроизводятся три документа, относящихся к увековечению памяти В. В. Петрова.

Академик В. В. Петров. 1761—1834. К истории физики и химии в России в начале XIX в. Сборник статей и материалов под ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., 250 стр., илл. (Акад. наук СССР. Труды Комис. по истории Акад. наук).

Сборник составлен из докладов и речей на юбилейных заседаниях, посвященных памяти В. В. Петрова.

Из содержания: С. И. Вавилов. Академик В. В. Петров—исследователь люминесценции.— В. К. Лебединский. Работы проф. В. В. Петрова по электричеству. — А. А. Елисеев. В. В. Петров — организатор физических кабинетов в России. В конце книги, в разделе «Приложения» приводится ряд документов, извлеченных из архивов, и аннотированная библиография опубликованных и рукописных трудов В. В. Петрова.

* *
*

Вавилов С. И. Физический кабинет. Физическая лаборатория. Физический институт Академии наук СССР за 220 лет. М.—Л., Акад. наук СССР, 1945, стр. 29—35.

То же: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. Работы по философии и истории естествознания. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 490—494.

Деятельность В. В. Петрова в Академии наук.

Радовский М. И. К 150-летию выхода в свет «Известия о гальвани-вольтовских опытах» В. В. Петрова.— «Физика в школе», 1953, № 1, стр. 19—21.

Капцов Н. А. К 150-летию со дня выхода в свет книги В. В. Петрова «Известие о гальвани-вольтовских опытах».— «Успехи физ. наук», 1953, т. 50, вып. 2, стр. 303—307.

Белькинд Л. Д. К 150-летию опытов В. В. Петрова с электрической дугой 29(17) мая 1802 г.—«Электричество», 1952, № 6, стр. 72—76, илл.

Залесский А. М. О приоритете В. В. Петрова в открытии электрической дуги.— «Электричество», 1952, № 11, стр. 68—69.

Путем математических расчетов автор показывает, что с помощью вольтова столба таких размеров, каким располагал Дэви, до 1808 года получить электрическую дугу было невозможно.

Елисеев А. А. Из истории открытия электрической дуги в России. (Новые материалы).— В кн.: Труды Совещания по истории естествознания 24—26 декабря 1946 г. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 120—131.

В статье рассказывается об откликах на открытие Вольта в России, первых опытах с вольтовым столбом в Петербурге, о документальных материалах, свидетельствующих об известности работ В. В. Петрова за рубежом.

Шнейберг Я. А. Труды академика В. В. Петрова в оценке его современников в России.— «Электричество», 1951, № 7, стр. 77—79.

Обзор печатных материалов, появившихся в начале XIX века в Петербурге и Москве.

Шнейберг Я. А. О батарее В. В. Петрова и его опытах с электрической дугой и разрядом в вакууме. К 150-летию выхода в свет книги «Известие о гальвано-вольтовских опытах».— «Электричество», 1953, № 12, стр. 71—75, илл.

Шнейберг Я. А. Об установлении академиком В. В. Петровым закономерности в электрической цепи. К 150-летию выхода в свет «Известия о гальвани-вольтовских опытах».— «Электричество», 1953, № 1, стр. 60—61.

В. В. Петровым был высказан ряд суждений, позволяющих говорить о том, что им в значительной мере был предвосхищен закон Ома (о взаимозависимости между действиями тока и площадью поперечного сечения проводника). Автор ссылается на работы Петрова, а также на статью «Забытый электротехник», опубликованную в одном из номеров английского журнала «Science Progress» за 1936 год.

Обе статьи Я. А. Шнейберга написаны на основании материалов, полученных при поверочных опытах, проведенных в Московском энергетическом институте.

Шнейберг Я. А. Труды в области электричества В. В. Петрова, его учеников и современников в России.— В кн.: Избранные труды по электричеству. Под ред. и с примеч. проф. Л. Д. Белькинда. М., Гостехиздат, 1956, стр. 239—278.

Краткая характеристика состояния науки об электричестве к концу XVII века. Открытие явлений гальванизма и первые работы по изучению электрического тока. Изучение В. В. Петровым явлений электрического тока. Открытие В. В. Петровым явле-

ния электрической дуги. Некоторые исследования В. В. Петрова в области электростатики. Труды учеников и современников В. В. Петрова в области изучения электрических явлений (С. В. Большой, В. Д. Телепнев, С. П. Власов и др.).

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 389—391.

История естествознания в России. Т. 1, ч. 1, стр. 377—379; ч. 2, стр. 127—133, 152 и др. (см. именной указатель ко 2-й части).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и Шнейберг Я. А. История техники, стр. 135, 136, 191—196 и др. (см. именной указатель).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Елисеев А. А. I. Опубликованные и неопубликованные работы В. В. Петрова. II. Список материалов и дел о научной, организационной и педагогической деятельности В. В. Петрова, хранящихся в Архиве Академии наук СССР в Ленинградском отделении Центрального исторического архива (ныне ЦГИАЛ).— В кн.: Академик В. В. Петров. 1761—1834. К истории физики и химии в России в начале XIX в. Сборник статей и материалов. М.—Л., Акад. наук СССР, 1940, стр. 193—247.

Труды В. В. Петрова аннотированы.

Елисеев А. А. Василий Владимирович Петров. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949. 180 стр.

Библиография (стр. 172—179): 1. Сочинения В. В. Петрова (опубликованные и неопубликованные). 2. Важнейшая литература о В. В. Петрове.



ТОМАС ЮНГ

(1773—1829)

Томас Юнг вошел в историю науки как выдающийся ученый-энциклопедист. Несмотря на свою обширную, казалось бы непосильную для одного человека научную деятельность, Юнг славился в то же время глубокими знаниями живописи, теории музыки, играл почти на всех известных тогда музыкальных инструментах. По свидетельству Д. Ф. Араго — автора ярко и художественно написанной биографии Юнга,— последний одно время выступал даже в знаменитом цирке Франкони как прекрасный и смелый наездник и канатоходец.

Научные труды Юнга посвящены вопросам механики, математики, оптики, акустики, теплоты, физиологической оптики, медицины, кораблестроения, астрономии, геофизики, филологии, зоологии, египтологии и т. д. Однако в истории английской и мировой науки Юнг известен прежде всего как физик, успешно развивавший волновую теорию света, впервые давший правильное, гениально смелое объяснение одного из важнейших явлений оптики — интерференции света.

Томас Юиг родился 13 июня 1773 года в Милвертоне (графство Сомерсетшир, Англия).

Необыкновенная одаренность и феноменальная память Юнга проявились у него уже в самом раннем детстве. Двух лет научившись бегло читать, он к четырем годам выучил наизусть множество произведений английских поэтов и много латинских стихов, даже не зная самого латинского языка. Уже в восемь-девять лет он овладел токарным ремеслом и мастерил физические приборы. В годы учения (с 9 до 14 лет) в частном пансионе в г. Комптоне Юнг самостоятельно овладел методом флюксий (дифференциальное исчисление) Ньютона. В пансионе же, помимо предусмотренных программой греческого и латинского языков, он самостоятельно изучил французский, итальянский, древнееврейский, персидский, арабский и другие языки.



Томас Юнг

различных цветов»[1]. Здесь Юнг впервые употребил термин «интерференция».

Юнгу принадлежит также заслуга первого осуществления физического опыта для наблюдения явления интерференции. В опыте Юнга интерферировали два луча, идущие от двух освещенных и близко расположенных щелей в непрозрачном экране, за которым помещался один точечный источник света. Таким образом, лучи, выходившие из щелей были когерентными. К этому опыту Юнга чрезвычайно близок опыт Френеля. Не зная о работах Юнга, он в 1815 году осуществил интерференцию лучей, получавшихся в результате отражения одного точечного источника света от двух слегка наклоненных друг к другу плоских зеркал. Оба этих опыта — как Юнга, так и Френеля, — до сих пор остаются классическими и служат для демонстрации и расчетов интерференционной картины.

В 1803 году в докладе «Опыты и исчисления, относящиеся к физической оптике» (опубликован в 1804 г. в «Philosophical Transactions») Юнг на основе открытого им закона интерференции сделал попытку объяснить явление диффракции при освещении тонкой нити. Впоследствии более точное объяснение явления диффракции дал Френель, использовавший для этого не только принцип интерференции, но и принцип Гюйгенса (см.), дополненный введенным им понятием так называемых «зон Френеля» (см.).

Заслуга Юнга заключается в том, что он первый связал явление диффракции с явлением интерференции.

В том же докладе 1803 года Юнг сообщил об открытии им интерференции ультрафиолетовых лучей и сделал новый, важный вывод о том, что отражение луча света от более плотной среды должно сопровождаться изменением его фазы на полволны (потерей полуволны). Этот вывод Юнг подтвердил на опыте.

В связи со своими работами по интерференции Юнг изобрел эриометр — прибор для измерения средней величины очень мелких частиц (шариков крови, цветочной пыльцы и т. п.) по их окрашиванию, вследствие интерференции отраженного от них света.

Результаты исследований Юнга по теории света были опубликованы им в 1807 году в двухтомном сочинении «Курс лекций по натуральной философии и механическим искусствам»[2].

К этому же времени относятся и знаменитые исследования Юнга по расшифровке египетских иероглифов, принесшие ему впоследствии мировую славу одного из основоположников египтологии.

Юнг был иностранным членом Парижской академии наук. Долгое время он занимал пост ученого секретаря Лондонского королевского общества. В 1818 году он был назначен секретарем так называемого «Бюро долгот» и руководил изданием «Морского календаря».

Выдающиеся физические открытия Юнга не принесли ему при жизни ни славы, ни признания. В оптике господствовала в то время корпуску-

---

[1] Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1. М., 1956, стр. 408.

[2] Произведения Т. Юнга на русский язык не переводились.

Решив вначале стать врачом, Юнг изучал медицину в университетах Лондона, Эдинбурга и Геттингена. В 1793 году он послал в Королевское общество свое первое научное сочинение — «Наблюдение над процессом зрения», в котором вслед за французскими учеными Соважем и Бурдело и на основании собственных опытов правильно объяснил явление аккомодации изменением кривизны хрусталика. Позднее, в 1800 году, очень тонкими опытами Юнг подтвердил правильность своих выводов. В 1795 году за свои исследования Юнг получил степень доктора медицины.

Однако все большее увлечение физикой, в особенности оптикой и акустикой, отвлекало Юнга от занятий медициной.

В 1801 году Юнг занял должность профессора Королевского института, где до 1804 года читал лекции по математической физике. К этим годам относятся его гениальные работы по интерференции (самый термин «интерференция» принадлежит Юнгу).

Еще в 1800 году в сочинении «Опыты и проблемы по звуку и свету» Юнг в период полного господства корпускулярной теории света высказал на основании своих опытов ряд сомнений в ее правильности и выступил в защиту волновой теории Гюйгенса. В этой же работе, рассматривая вопросы акустики, Юнг впервые указал на усиление и ослабление звука при наложении друг на друга звуковых волн — иначе говоря, на интерференцию звуковых волн.

Интерференцию света в виде явления окрашивания тонких пленок (например, в мыльных пузырях) наблюдали до Юнга Бойль и Гук, но не смогли объяснить это явление. Много сил положил на разрешение той же проблемы Ньютон. Впервые правильное ее решение дал 24-летний Юнг. Отступив от обычного представления, будто налагающиеся друг на друга волны могут лишь усиливать друг друга, Юнг, исходя из своих опытов со звуком и волнами на воде, выдвинул смелое предположение, что при некоторых условиях налагающиеся волны ослабляют или даже совершенно уничтожают друг друга.

Темные полосы, возникающие на пленках неодинаковой толщины при освещении их монохроматическим светом, Юнг объяснил полным уничтожением лучей, отраженных от задней и передней поверхностей пленки при их встрече. При этом Юнг указал и на основное условие получения интерференции, подчеркнув, что интерферируют лишь «две части *одного* и *того* же света». По современной терминологии это — требование когерентности лучей [1].

В 1801 году в работе, опубликованной в английском научном журнале, «Philosophical Transactions», Юнг дал формулировку открытого им закона интерференции: «Везде, где *две части одного и того* же света попадают в глаз различными путями, либо точно, либо весьма близко по направлению, свет становится более сильным там, где разность путей есть целое кратное некоторой длины, и наименее сильным в промежуточных состояниях *интерферирующих* частей; и эта длина различна для света

---

[1] Когерентными называются лучи, колебания в которых происходят с одинаковой частотой (длиной волны), в одной и той же плоскости (одинаково поляризованные лучи) и с постоянной разностью фаз.

лярная теория. Возрождение Юнгом взглядов Гюйгенса встречено было резкой критикой.

В последние годы жизни, тяжело больной, Юнг отошел от занятий физикой и продолжил свои труды по созданию египетского словаря, который был опубликован уже после смерти ученого.

Умер Юнг 10 мая 1829 года.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Т. ЮНГА

Юнг Томас (1773—1829).— БСЭ, изд. 2-е, т. 49, 1957, стр. 396—397.

Араго Ф. Томас Юнг. Биография, читанная в публичном заседании Академии наук 26 ноября 1832 г.— «Успехи физ. наук», 1937, т. 18, вып. 2, стр. 253—278.

Перепечатано из книги: Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Пер. Д. Перевощиков. Т. 2. Спб., 1860, стр. 31—66.

Рождение Юнга, его детство, годы учения. Теория света, интерференция. Египетские иероглифы, история их первого объяснения. Сочинения Юнга. Характер Юнга, его медицинская практика, его участие в издании «Морского календаря». Последние годы жизни.

Ландсберг Г. С. Огюстен Френель. Очерк жизни и деятельности.— В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. Пер. с франц. З. А. Цейтлина. Под ред. Г. С. Ландсберга. М., Гостехиздат, 1955, стр. 7—69.

Значительное внимание в очерке уделено работам Юнга по волновой теории света (стр. 12—17).

Полак Л. С. Из истории волновой теории света. (Волновая теория света Т. Юнга).— «Вопросы истории естествознания и техники», 1956, вып. 2. стр. 76—91.

Анализ оптических трудов Юнга и частично его переписки с Френелем, Араго и др. Определяя место Юнга в истории волновой теории света, автор показывает влияние на Юнга Ньютона и, в свою очередь, влияние Юнга на Френеля, в особенности в разработке теории дифракции и принципа поперечности световых колебаний.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 403—413.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3., вып. 1, стр. 73, 140—147, 172—176 и др.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 240, 246—249 и др.

Цейтлин З. А. Развитие воззрений на природу света.— В кн.: Томсон Дж. Дж. Электричество и материя. М.—Л., Гос. изд., 1928, стр. 132—171.

Соминский М. С. Очерки по истории воззрений на природу света. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 73—90.

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского. М., Гостехиздат, 1957, стр. 112—121.

Глава IV. Сопротивление материалов в первой трети XIX века. 22. Томас Юнг. Очерк посвящен главным образом трудам Юнга в области механики материалов.

АНДРЕ МАРИ АМПЕР

(1775—1836)

Труды французского ученого Андре Марн Ампера положили начало новой обширной области физики — электродинамике. Ему же принадлежат выдающиеся труды в области высшей математики и ее приложений к важнейшим задачам физики.

Ампер родился 22 января 1775 года в г. Лионе в семье коммерсанта. Уже в возрасте 12—14 лет он приобрел широкие познания благодаря своей всепоглощающей страсти к чтению в сочетании с выдающимися способностями и феноменальной памятью. К этому времени он прочитал все 20 томов знаменитой энциклопедии Д'Аламбера и Дидро, изучил алгебру, геометрию и самостоятельно овладел латынью, чтобы читать сочинения Эйлера и Бернулли. В 13 лет Ампер представил в Лионскую академию наук свою первую работу, в которой пытался исследовать сложнейший вопрос о квадратуре круга. К 18 годам Ампер в совершенстве владел высшей математикой и, кроме латинского, знал греческий и итальянский языки.

Материальная необеспеченность вынудила Ампера, вопреки его склонностям, заняться педагогической деятельностью. Вначале он давал частные уроки, затем преподавал физику и химию в Центральной школе г. Бурга (1801—1803), а с 1803 года — математику и астрономию в Лионском лицее. В 1805 году по рекомендациям Лаланда и Деламбра, восхищенных появившимися к тому времени первыми математическими работами Ампера, он получил место репетитора, а в 1807 году был назначен профессором математики в Политехнической школе Парижа, где с 1809 года заведовал кафедрой высшей математики и механики. Позднее, с 1824 года Ампер был профессором экспериментальной физики в Нормальной школе (Коллеж де Франс) Парижа.

Научная деятельность Ампера началась блестящими математическими исследованиями. Его первое сочинение — «Опыт математической теории игры» (1802 г.) явилось одним из первых научных исследований по



Андре Мари Ампер

теории вероятностей — разделу математики, играющему важную роль в физике. В течение 1805—1809 гг. Ампер опубликовал ряд работ, посвященных приложению методов высшей математики к задачам механики. В 1813 году за работы по теории дифференциальных уравнений он был избран в члены Парижской академии наук.

Одновременно с этими работами внимание Ампера все более и более привлекали проблемы физики. В разные годы, начиная с 1809 года, появилось несколько его работ, в которых он математическими методами решил ряд задач из области оптики и теории газов.

Однако основной заслугой Ампера в области физики явились его гениальные исследования по электричеству и магнетизму.

Электрические и магнитные явления еще со времен Гильберта (начало XVII в.) считались явлениями совершенно различной природы. Электрические явления объясняли наличием в телах одной (Франклин, Эпинус) или двух (Дюфэ, Кулон) электрических жидкостей, а магнитные, по аналогии,— наличием одной или двух магнитных жидкостей. В конце XVIII века стали известны законы взаимодействия неподвижных электрических зарядов и взаимодействия магнитных полюсов (законы Кулона). Совершенно особым считалось открытое в конце XVIII века и еще почти не изученное явление гальванического тока.

Так было до 1820 года, когда в Парижскую академию наук пришло сообщение об опыте датского физика Эрстеда (см.), открывшего действие гальванического тока («электрического конфликта», как называл его Эрстед) на помещенную вблизи него магнитную стрелку. Впервые в истории науки была экспериментально доказана связь между электрическими и магнитными явлениями.

Ампер глубоко заинтересовался новым явлением. Он повторил опыт Эрстеда и уже через несколько дней, 18 сентября 1820 года сделал в Парижской академии наук сообщение о своих новых и важных открытиях в этой области.

Ампер показал, что магнитная стрелка вблизи проводника с током устанавливается перпендикулярно проводнику независимо от мощности источника тока (вольтова столба). Замеченные Эрстедом отклонения в направлении стрелки от перпендикулярного Ампер правильно объяснил действием земного магнетизма и в своих опытах сумел остроумным способом исключить это действие. На этом же заседании Ампер сформулировал «правило пловца» для определения направления, в котором — при пропускании по проводнику тока — устанавливается северный конец стрелки, расположенной вблизи проводника. «Правило пловца» в первоначальной формулировке Ампера гласит: наблюдатель, как бы плывущий в направлении электрического тока так, что он обращен лицом к магнитной стрелке, расположенной около проводника, видит северный полюс этой стрелки отклоненным влево. При этом Ампер впервые ввел название «электрический ток» и понятие направления тока как направления движения положительного электричества.

Размышляя над поведением магнитной стрелки в магнитном поле Земли, Ампер пришел к мысли, что положение стрелки в данном случае можно объяснить — по аналогии с опытом Эрстеда — наличием в Земле

токов, обтекающих ее с Запада на Восток. Эти соображения привели его к гениальному выводу, что и все магнитные взаимодействия могут быть объяснены наличием в магнитах замкнутых электрических токов, обтекающих магниты в плоскостях, перпендикулярных к их магнитным осям. Это положение составило основу электродинамической теории магнетизма Ампера.

На том же заседании 18 сентября он впервые изложил свою теорию магнетизма, согласно которой электрические и магнитные явления имеют общую, электрическую природу.

Исходя из своей теории, Ампер тогда же высказал мысль, что проводники с током, изогнутые в виде спиралей (соленоиды), должны действовать, как магниты. В сообщении 25 сентября Ампер имел уже возможность доложить об открытии им взаимодействия круговых токов (спиралей), а 9 октября — об открытии им взаимодействия прямых токов. Ампер установил, что в отличие от взаимодействия неподвижных зарядов — притяжения разноименных и отталкивания одноименных,— характер взаимодействия движущихся зарядов (токов) зависит единственно от относительного направления их движения. При одинаковых направлениях токов проводники притягиваются, при противоположных — отталкиваются. Открытие законов взаимодействия токов положило начало новой науке — электродинамике.

В последующих сообщениях, в октябре и ноябре 1820 года Ампер объяснил с точки зрения своей теории магнетизма ряд физических явлений, в частности, открытое незадолго перед тем французским физиком Араго явление намагничивания стальной иглы током. По предложению Ампера для усиления эффекта игла помещалась внутрь соленоида. В этом опыте Араго — Ампера был впервые осуществлен, таким образом, электромагнит. Ампер объяснил также открытое им действие Земли на проводник с током.

Развивая теорию магнетизма, Ампер в 1822 году пришел к идее элементарных токов. Все магнитные явления он объяснял наличием в телах молекулярных замкнутых электрических токов. Намагничивание тела состоит, по теории Ампера, в упорядочении ориентации плоскостей этих молекулярных токов, которые в ненамагниченных телах расположены хаотически. Теория магнетизма Ампера была встречена его современниками недоверием и резкой критикой, но, как замечательно писал об этом Араго, «слава и спокойствие не всегда идут рука с рукою...; только мелкие дела и мелкие умы не встречают затруднений и пользуются невозмутимым миром под покровом посредственности» [1].

Гипотеза Ампера об элементарных токах оказалась очень плодотворной. В начале XX века работы Н. Бора, в которых он исследовал строение атома, подтвердили реальность амперовских токов. Гипотеза Ампера легла в дальнейшем в основу электронной теории магнетизма, согласно которой причиной магнитных свойств тел являются элементарные токи, обусловленные движением электронов вокруг ядра атома.

---

[1] Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т. 2. Спб., 1860, стр. 282.

Начиная с 1822 года, Ампер настойчиво искал точный количественный закон взаимодействия токов. Путем математического анализа полученных им результатов он установил, что сила взаимодействия двух элементов тока прямо пропорциональна произведению сил токов [1] и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Закон взаимодействия токов был опубликован в 1826 году в основном труде Ампера по электродинамике — «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

В своем знаменитом «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.) Максвелл дал самую высокую оценку трудам Ампера. Он писал: «Экспериментальные исследования, которыми Ампер установил законы механического взаимодействия между электрическими токами, являются одним из наиболее блестящих достижений науки.

Все в совокупности, и теория и эксперимент, как будто появилось в полной зрелости и в полном вооружении из головы «Ньютона электричества». Эти исследования законченны по форме, идеальны по точности и резюмированы в формуле, из которой могут быть выведены все явления и которая навсегда должна остаться фундаментальной формулой электродинамики» [2].

После 1828 года Ампер вновь возвращается к математическим исследованиям. В этот последний период своей жизни он опубликовал ряд работ по высшей математике. Наиболее значительной из них является его «Изложение принципов вариационного исчисления».

Помимо занятий математикой и физикой, Ампер на протяжении всей своей жизни глубоко интересовался самыми различными научными проблемами. Ему принадлежит первая научная попытка классификации химических элементов по их сходству (1816 г.). Захваченный спором натуралистов о том, как появились на Земле различные виды растений и животных, Ампер принял в нем горячее участие. Он высказал ряд смелых и верных мыслей, защищая вместе с Сент-Илером, против Кювье, идею эволюции видов, не исключая и человека. Ампер занимался философией и психологией, с величайшим увлечением изучал проблемы языкознания. Особый интерес представляет его попытка создать классификацию наук. Над этой сложной проблемой трудились еще в глубокой древности Аристотель, Платон, а в XVII—XVIII вв. Бэкон, Лейбниц, Локк, Д'Аламбер и др. Тем не менее во времена Ампера в этой области царила путаница, особенно усилившаяся в период бурного развития наук в XVIII — начале XIX вв., когда почти каждое крупное открытие начинало собою новую отрасль знания. Свои исследования Ампер изложил в большом труде «Опыт философии наук, или аналитическое изложение естественной классификации всех человеческих знаний» (первый том вышел в 1834 г., вто-

---

[1] Термин был введен Ампером на основе представлений об электрической жидкости. Ампер понимал под силой тока количество электрической жидкости, протекающей за 1 ед. времени через поперечное сечение проводника.

[2] Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., Гостехиздат, 1954, стр. 381—382.

рой — посмертно — в 1843 г.). Классификация, предложенная Ампером, свидетельствовала о глубоких и обширных знаниях ее автора, содержала многие верные мысли, но была слишком сильно дифференцирована и не утвердилась в науке. Между прочим, в классификации Ампера среди названий других наук впервые появилось слово «кибернетика», хотя сама эта наука оформилась лишь спустя почти полтора века, и только в наши дни первые плоды ее — электронно-счетные машины, машины-переводчики, и т. д. — говорят о том, как велики перспективы ее развития.

Жизнь Ампера сложилась тяжело. Большие личные утраты, семейные неприятности, постоянные материальные трудности, вынуждавшие его, помимо преподавания, заниматься еще и утомительными административно-хозяйственными делами, — все это тяжело отражалось на Ампере, человеке крайне слабого здоровья. Поэтому его открытия, как писал Араго, «...составляют весьма небольшую часть тех сокровищ, которых следовало бы ожидать от беспримерных дарований, от редкого соединения способности проникать в подробности со способностью приводить их в общность, превращать их в законы»[1].

10 июля 1836 года великий ученый скончался.

ТРУДЫ А. М. АМПЕРА

Ампер А. М. Электродинамика. Ред., статьи и примеч. проф. Я. Г. Дорфмана. Л., 1954. 492 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

Основное место в книге занимает фундаментальный труд «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта» (стр. 7—220), впервые опубликованный в Париже отдельным изданием в 1826 году. Из электродинамических исследований Ампера в книгу вошли следующие работы: Труд, представленный Королевской академии наук 2 октября 1820 года и содержащий резюме докладов, прочитанных в Академии 18 и 25 сентября 1820 года относительно действий электрических токов.— Ответ на письмо г. Фан-Бека относительно нового опыта по электромагнетизму. Впервые спубликовано в 1821 году.— Краткое изложение новых опытов по электромагнетизму, выполненных различными физиками с марта 1821 года. Впервые опубликовано в 1822 году.—О воздействии земли на вольтаические проводники. Впервые опубликовано в 1822 году.—О взаимодействии вольтаического проводника и магнита. Впервые опубликовано в 1828 году.— Письмо к г. д-ру Герарди. (Дополнение к исследованию о взаимодействии вольтаического проводника и магнита). Впервые опубликовано в 1827 году.

В приложениях приводятся работы физиков-современников Ампера, тесно связанные с его исследованиями:

Г. Хр. Эрстед. Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку — Ф. Араго. Опыты, относящиеся к намагничиванию железа и стали действием вольтаического тока. — А. Де-ля-Рив (сын). О воздействии земного шара на подвижной участок вольтаического контура.

Справочный аппарат содержит примечания, перечень трудов А. М. Ампера и литературы о нем, именной указатель.

Переводы выполнены Т. Н. Кладо, Я. Г. Дорфманом и Е. М. Шифриной.

---

[1] Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т. 2. Спб., 1860, стр. 310.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. М. АМПЕРА

Ампер Андре Мари (1775—1836).— БСЭ, 2-е изд., т. 2, 1950, стр. 295.

Дорфман Я. Г. Краткая биография А. М. Ампера.— В кн.: Ампер А. М. Электродинамика. Л., Акад. наук СССР, 1954, стр. 428—432.

Забаринский П. П. и Полак Л. С. Андре Мари Ампер. (К 100-летию со дня смерти — 10 июня 1936 г.).— «Наука и жизнь», 1936, № 6, стр. 49—52.

Ландсберг Г. С. Андре Ампер.— «Радиофронт», 1936, № 13, стр. 45—48; № 14, стр. 52—54.

Шостьин Н. А. Андре Мари Ампер.— «Электричество», 1944, № 3, стр. 29—30.

* *
*

Забаринский П. П. Ампер. М., Жургазобъединение, 1938. 176 стр., портр. (Жизнь замечательных людей. Серия биографий. Вып. 1(121)).

Наиболее крупная на русском языке биография Ампера. История жизни великого физика развертывается на широком фоне современной ему эпохи, в тесной связи с творчеством его предшественников и современников. Глава шестая книги (стр. 113—144) посвящена работам Ампера в области электричества.

Араго Ф. Ампер.— В кн.: Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Пер. Д. Перевощиков. Т. 2. Спб., 1860, стр. 235—312.

Биография Ампера, написанная его близким другом и соучастником работ. Одна из лучших книг об Ампере — человеке, ученом, педагоге, мыслителе.

* *
*

Дорфман Я. Г. Возникновение электродинамики Ампера и ее место в истории физики.— В кн.: Ампер А. М. Электродинамика. Л., Акад. наук СССР, 1954, стр. 407—427, портр.

Краткий исторический обзор формирования электродинамики Ампера — от первого его выступления в Парижской академии наук в сентябре 1820 года до опубликования в 1826 году его знаменитого труда «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

Брэгг В. Г. История электромагнетизма. Пер. с англ. М. П. Шаскольской. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 15—16.

Лебедев В. И. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 143—154.

Разделы: Работы Ампера по электромагнетизму. Теория Ампера и отношение к ней других физиков. Формула Ампера.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 419—426.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 339—342.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 193—199.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 206—213.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 200—204, 208, 212 и др. (см. именной указатель).

ГАНС ХРИСТИАН ЭРСТЕД

(1777—1851)

Открытия датского физика Эрстеда положили начало исследованиям электромагнитных явлений.

Ганс Христиан Эрстед родился 14 августа 1777 года в г. Рудкёбинге (на одном из Датских островов) в семье аптекаря. Работа в химической лаборатории, где Эрстед уже 11-летним мальчиком помогал отцу, и чтение книг по химии пробудили в нем интерес к естественным наукам. В 1797 г. Эрстед закончил Копенгагенский университет, где учился на медицинском факультете. Уже в эти годы сказалась широта интересов Эрстеда. С особым увлечением слушая лекции по физике и математике, он в то же время написал сочинение по эстетике (1796 г.) и статью по медицине (1798 г.), отмеченные золотыми медалями университета. В 1798 году Эрстеду была присуждена степень доктора философии. Однако лишь с большим трудом, после усиленных хлопот друзей ему удалось получить должность преподавателя физики и химии в университете, причем без всякой оплаты его труда. После поездки в Германию и Францию (1801—1804), где Эрстед близко познакомился с крупнейшими философами (Фихте, Шлегелем) и учеными (Риттером, Шарлем, Кювье, Бертолле) того времени, он возвратился в Данию и организовал чтение частных лекций по физике и химии. Огромный успех этих лекций в большой степени содействовал назначению Эрстеда в 1806 году экстраординарным профессором физики и химии в Копенгагенском университете. В дальнейшем, с 1817 года он был ординарным профессором и членом правления Копенгагенского университета, а с 1829 года занимал, кроме того, пост директора Копенгагенской политехнической школы.

С 1815 года до конца жизни Эрстед был секретарем Королевского научного общества Дании.

Сочетая в себе блестящие дарования ученого с большим педагогическим талантом, Эрстед немало способствовал коренной реорганизации преподавания физики в учебных заведениях Дании. Он создал первую в

стране физическую лабораторию, организовал Общество распространения естествознания. Физика при Эрстеде перестала быть второстепенным предметом, какой она была в Дании (как и в других странах), и стала самостоятельной дисциплиной.

Много сил положил Эрстед на создание отечественной физической школы. По его учебнику «Наука всеобщих законов природы» в Дании велось преподавание физики в течение 50 лет. Большое значение Эрстед придавал изучению истории науки.

Научные исследования Эрстеда, начало которых относится к первым годам XIX столетия, были глубоко проникнуты идеей всеобщей взаимосвязи явлений в природе. В многочисленных опытах, проведенных им совместно с Риттером в Германии, Эрстед искал связь между тепловыми и электрическими явлениями, показал сходство химического воздействия одних веществ на другие с действием света на те же вещества (выцветание красок). Позднее (1807 г.) в своих обширных исследованиях в области акустики Эрстед пытался обнаружить возникновение электрических явлений при звуковых колебаниях.

Мысль о существовании связи между электрическими и магнитными явлениями возникла у Эрстеда в эти же годы во время гальванических опытов, которыми он усиленно занимался после изобретения Вольта первой гальванической батареи (вольтова столба). С этого времени Эрстед с большим упорством искал эту связь и весной 1820 года пришел к замечательному открытию: он обнаружил действие проводника с током на магнитную стрелку, которая вблизи проводника всякий раз устанавливалась в одном и том же положении — приблизительно перпендикулярно проводнику.

21 июля 1820 года Эрстед опубликовал статью «Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта (так Эрстед называл электрический ток. — *С. Е.*) на магнитную стрелку», где описал свое открытие. Он сделал, в частности, вывод, что направление стрелки вблизи проводника зависит не только от направления проводника, но и от мощности источника тока, а именно от размеров вольтова столба. Ошибочность этого заключения была впоследствии показана Ампером (см.). В той же статье Эрстед впервые сообщил, что контур с током (т. е. проводник, изогнутый в виде почти замкнутой кривой) ведет себя вблизи прямолинейного проводника с током, как магнитная стрелка. Это подтверждало высказанную Эрстедом еще в 1813 году («Исследование сходства электрических и химических сил») догадку, «...что магнитный эффект производится электричеством». Эрстед не продолжил и не развил своих исследований, ограничившись только описанием чисто качественного характера. Это сделал в том же году Ампер. Тем не менее величайшей заслугой Эрстеда явилось открытие самого факта взаимодействия тока и магнита.

Характеризуя значение этого открытия, Фарадей писал: «Эрстед уже в 1807 году поставил себе целью изучить, «оказывает ли электричество в его латентном (скрытом — *С. Е.*) состоянии какое-либо действие на магнит». В то время его оригинальные взгляды не были подтверждены опытами, но настойчивость, с которой он как теоретически, так и практически



Ганс Христиан Эрстед

стремился к своей цели, была вознаграждена... открытием одного факта, существование которого никто, кроме него, даже отдаленно не мог предполагать, но который, став известным, не замедлил привлечь внимание всех могущих оценить его важность и значение»[1].

Открытие Эрстеда явилось мощным стимулом к научным исследованиям и положило начало новой области физики — области электромагнитных явлений. Уже вскоре, в том же 1820 году, Ампер сообщил о своих знаменитых электродинамических исследованиях и о своей электродинамической теории магнетизма, а Ф.-Д. Араго (1786—1853) — об изобретении им электромагнита; в 1821 году И. Швейггер (1779—1857) изобрел первый чувствительный гальванометр-мультипликатор, с помощью которого Т.-И. Зеебек (1770—1831) открыл через год (1822) явление термоэлектричества; в свою очередь, использование чувствительного гальванометра создало условия для установления фундаментальных законов постоянного электрического тока (Ом, 1826 г.).

Следует отметить, что сам Эрстед после сделанного им открытия один из первых высказал глубоко верные догадки о существовании связи между светом и электромагнетизмом, а также близко подошел к идее существования электрического и магнитного полей.

Открытие Эрстеда было высоко оценено: две крупнейшие академии наук удостоили его высших наград — в 1822 году Лондонское королевское общество присудило ему медаль Коплея, Французская академия — золотую медаль.

После 1820 года Эрстед продолжал свои экспериментальные исследования по сжимаемости газов и жидкостей (опубликованы в период 1817—1845), а в последних своих работах (1849 г.) исследовал свойства пара- и диамагнитных тел. Однако эти исследования Эрстеда не имели того значения, как его открытия 1820 года.

Эрстед работал до последних дней жизни и умер почти внезапно 9 марта 1851 года.

Выдающийся ученый, кроме своих больших научных заслуг, оставил у современников, а через них и у последующих поколений замечательную память о себе как о человеке. Он отличался исключительной мягкостью характера и чуткостью к людям. Дом его в Копенгагене был культурным центром, где собирались ученые, писатели, философы. «...Это был не только великий и редкий ученый и мыслитель, но и великий и редкий человек»,— писал об Эрстеде датский ученый и поэт И.-К. Гаух в 1852 году.

«Сердцем ребенок и глубокий философ»,—сказал об Эрстеде бывший одно время его студентом знаменитый датский писатель Ганс-Христиан Андерсен.

ТРУДЫ Г. Х. ЭРСТЕДА

Эрстед Г. Х. Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку.— В кн.: Ампер А. М. Электродинамика. Л., Акад. наук СССР, 1954, стр. 433—439.

---

[1] Фарадей М. Избранные работы по электричеству. М.—Л., 1939, стр. 10.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г. Х. ЭРСТЕДА

Эрстед Ханс Кристиан (1777—1851). — БСЭ, 2-е изд., т. 40, 1957, стр. 172.

Каменецкий М. О. Ганс Христиан Эрстед (1777—1837 гг.).— «Наука и техника», 1937, № 18, стр. 13, илл.

Нильсен И.-Р. Ганс Эрстед. (Пер. с англ. И. Б. Файнбойма).— «Физика в школе», 1939, № 4, стр. 11—16, портр.

Лебедев В. И. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. М., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 131—137, илл.

Автор знакомит с содержанием мемуара Эрстеда, используя его формулировки и схемы, иллюстрирующие его опыты.

Дорфман Я. Г. Возникновение электродинамики Ампера и ее место в истории физики. В кн.: Ампер А.-М., Электродинамика. Л., Акад. наук СССР, 1954, стр. 407—427.

Исторический очерк развития идей электродинамики в трудах предшественников Ампера и в его собственных трудах.

Эрстеду посвящены в этом очерке стр. 408—410.

* *
*

Фарадей М. Опыт истории электромагнетизма.— В кн.: Фарадей М. Избранные работы по электричеству. Пер. под ред. и примеч. З. А. Цейтлина. М.—Л., ГОНТИ. Ред. техтеорет. лит., 1939, стр. 9—53.

«Опыт истории» относится к 1821—1822 гг. Эрстеду и его открытию посвящены в этом очерке стр. 9—17, 41—43 и др.

Кудряевцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 418—419.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 191, 333—337, 342, 362—364.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 189—194.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 202—204.

Брэгг В. Г. История электромагнетизма. Пер. с англ. М. П. Шаскольской. М.—Л., Гостехиздат, 1947. 36 стр.

Автор этой небольшой работы — крупный английский физик (1862—1942). Книга возникла из лекции, прочитанной автором в 1941 году в одном из лондонских институтов для довольно широкой аудитории. Цель лекции, как она определена автором: «дать беглый очерк того, как постепенно осознавались основные принципы электромагнетизма, и коротко описать вклад в науку ее главных деятелей». Об открытии Эрстеда говорится на стр. 9 и 13—15.



ГЕОРГ СИМОН ОМ
(1787—1854)

Немецкий физик Георг Симон Ом родился 16 марта 1787 года (по другим данным — в 1789 г.) в г. Эрлангене (Германия) в семье ремесленника. Ом учился в Эрлангенском университете, однако вследствие материальных трудностей он смог окончить его только в 1813 году. В течение многих лет он преподавал математику, а затем физику — сначала в средних учебных заведениях Готдштадта, Бамберга и Кельна (1813—1826), а потом в Берлинской военной школе. С 1833 года Ом был профессором физики, а с 1839 года—ректором Нюренбергской высшей политехнической школы. Последние пять лет жизни Ом занимал пост профессора физики в Мюнхенском университете.

Свои основные исследования по физике — исследования явлений в электрической цепи — Ом провел в Кельне. В этой области физики в первой четверти XIX века накопился обширный экспериментальный материал. Но большей частью это были разнообразные наблюдения качественного характера. Законы электрического тока в цепи все еще оставались неизвестными. Событием исключительной важности явилось открытие Эрстедом взаимодействия тока и магнита (1820 г.). Оно повлекло за собой изобретение первых точных чувствительных приборов для измерения тока (Швейггер и Поггендорф, 1821 г.), а это открывало возможности для точных количественных исследований в области явлений в электрической цепи. Задача отыскания законов тока стала теперь одной из самых актуальных. Заслуга ее решения принадлежит Ому.

В решении этой задачи Ому существенно помогли исследования известного английского физика и химика Дэви, который еще в 1821 году обнаружил по интенсивности выделения газа на электродах гальванического элемента, что проводимость прямо пропорциональна диаметру и обратно пропорциональна длине проводника. Особенно большое значение для успеха исследований Ома имела опубликованная в 1822 году теория теплопроводности («Аналитическая теория тепла») знаменитого французского математика Ж. Фурье.



Георг Симон Ом

«Я исходил из предположения,— писал Ом в 1822 году,— что передача электричества от одной какой-либо частицы происходит прямо только к одной соседней с нею частице... Величину потока между двумя смежными частицами при всех равных прочих обстоятельствах я считал пропорциональной разности электрических сил, существующих в обеих частицах; точно так и в теории теплоты тепловой поток между двумя частицами рассматривается, как пропорциональный разности их температур»[1]. Эта мысль Ома об аналогии между электрическим током и передачей тепла в теле оказалась чрезвычайно плодотворной и является признанной заслугой Ома.

Однако прежде чем вывести простые с виду формулы закона для цепи постоянного тока, известные теперь каждому школьнику, Ому пришлось проделать огромную экспериментальную работу. Ом был выдающимся экспериментатором, опыты его отличались крайней тщательностью, тем не менее условия опыта — непостоянство э. д. с. и внутреннего сопротивления гальванического элемента — так осложняли явления, что выявить закон тока долгое время не удавалось.

Только в 1826 году, после того, как Ом применил в качестве источника тока не гальванический элемент, а термопару (висмуто-медную, с разностью температур на спаях 100° С), свободную от указанных недостатков, ему удалось установить основной закон цепи постоянного тока.

Ом измерял действие тока на включенный в цепь электроскоп — так называемую электроскопическую силу (иначе говоря, потенциал). В формулировке Ома открытый им закон гласил: при прочих равных условиях (т. е. при постоянном сопротивлении в цепи) ток в цепи прямо пропорционален разности электроскопических сил (т. е. напряжению).

Понятие сопротивления как важной характеристики электрической цепи было также введено Омом. Он ввел это понятие как величину, обратную проводимости проводника. Именно благодаря открытию Ома эта величина, а следовательно, и величина проводимости, стала точно определяемой как коэффициент пропорциональности между током и напряженностью. В дальнейшем понятие сопротивления усложнилось. В настоящее время различают активное, или омическое сопротивление в цепи постоянного тока и реактивное — сопротивление, возникающее в цепи переменного тока при включении в цепь индуктивности или конденсатора или того и другого вместе.

Впервые закон тока в цепи был сформулирован в работе Ома «Определение закона, по которому металлы проводят электричество» (1826 г.). В опубликованной через год после этого большой монографии «Гальваническая цепь в математической обработке» (1827 г.) Ом обосновал его теоретически.

Сочинение Ома было встречено крайним недоверием и резкой критикой, а его выдающееся открытие более 10 лет вообще не признавалось целым рядом физиков. Отчасти это объяснялось тем, что повторить опыты Ома с положительными результатами было очень трудно из-за невысокого уровня экспериментальной техники того времени.

---

[1] «Электричество», 1954, № 7, стр. 71 (цитата приводится с некоторыми уточнениями).

Тяжелое материальное положение, в котором пребывал в те годы Ом, вопреки его надеждам, не улучшилось: находясь в это время в Берлине, он с трудом получил место преподавателя в военной школе с небольшим окладом. Все это и особенно игнорирование результатов его научных трудов тяжело отразилось на ученом и вызвало у него горькие слова: «Моя «Гальваническая цепь»,— писал он своему другу физику И. Швейггеру,— причинила мне ужасные огорчения, и я был готов проклясть час ее зарождения» [1].

Однако многие физики уже в 30-е годы XIX в., т. е. вскоре после открытия Омом закона тока, пытались применить его в своих исследованиях (Фехнер, Ленц, Якоби и др.). В 1837 году этот закон получил подтверждение в работах французского физика Клода Пуйе (или Пулье), который повторил опыты Ома. Признание трудов Ома становилось всемирным. Гаусс указал на исключительно большое значение исследований своего соотечественника, а видный американский физик Джозеф Генри (1791—1878) посвятил работе Ома восторженные и яркие слова. «Когда я в первый раз прочел теорию Ома,— писал он,— то она мне показалась молнией, вдруг осветившей комнату, погруженную во мрак» [2]. В 1841 году Лондонское королевское общество присудило Ому золотую медаль Коплея. В том же году появился английский перевод сочинения Ома. Уже после смерти ученого, в 1881 году, на Международном съезде физиков в Париже его именем была названа практическая единица электрического сопротивления (в Англии еще в 1870 году единицу сопротивления называли «омада», а затем «ом»). Закон, открытый Омом, был признан основным законом электрической цепи [3] и назван его именем.

Умер Ом 7 июля 1854 года.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г.-С. ОМА

Ом Георг-Симон (1787—1854). — БСЭ, 2-е изд., т. 31, 1954, стр. 11—12, портр.

Орлов С. А. Георг Ом (1787—1854).—«Наука и техника», 1937, № 11, стр. 7—8, портр.

Колубовский М. Георг-Симон Ом. (К 150-летию со дня рождения).— «Фронт науки и техники», 1937, № 8—9, стр. 165—166.

Радовский М. И. К 150-летию со дня рождения Ома.— «Электричество», 1939, № 12, стр. 58—61, портр.

Краткие биографические справки.

Поливанов К. М. Георг-Симон Ом. К столетию со дня смерти.— «Электричество», 1954, № 7, стр. 70—76, портр.

Очерк жизни и деятельности Ома с оценкой его работ современниками. Закон Ома, его содержание и значение (наиболее важное в статье). Использованная литература.

---

[1] «Электричество», 1954, № 7, стр. 71.

[2] Там же.

[3] Следует отметить, что в современной физике и электротехнике закон Ома применяется при расчетах электрических цепей не только постоянного, но и, с некоторыми усложнениями, переменного тока.

Попов К. К. Историческое развитие закона Ома.— «Труды Ленингр. электротехн. ин-та инженеров сигнализации и связи НКПС», 1940, вып. 2, стр. 184—199.

Закон Ома, став отправным пунктом для ряда последующих исследований (Кирхгофа, Гельмгольца и других), в свою очередь, был завершением большого числа исследований, начатых Стефаном Греем в 1729 году и продолжавшихся около ста лет. В статье К. К. Попова прослежен этот путь от первых опытов Грея, во время которых он наблюдал переход электрических зарядов от одного тела к другому, до исследований Ома включительно.

* *
*

Лебедев В. И. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 156—160, илл.

Раздел: Закон Ома и значение его исследований.

Краткое описание опытов Ома; математическая формулировка выведенной им взаимосвязи между силой тока, напряжением и сопротивлением провода в электрической цепи.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 428—429.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 345—351.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 171, 202—205; вып. 2, стр. 175—177 и др. (см. именной указатель).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 194, 206, 207, 212.

ОГЮСТЕН ЖАН ФРЕНЕЛЬ

(1788—1827)

Великому французскому физику Огюстену Жану Френелю принадлежит бессмертная заслуга разработки и утверждения волновой теории света.

Френель родился 10 мая 1788 года в г. Брольи, на севере Франции, в семье военного архитектора. Он получил блестящее математическое образование в Политехнической школе Парижа, но подготовка по физике у него была слабой. В 1809 году Френель окончил Школу мостов и шоссейных дорог и затем в течение нескольких лет работал инженером по ремонту и прокладке дорог в различных округах Франции. Заинтересовавшись открытиями Малюса [1], Френель в 1811 году самостоятельно занялся изучением физики и вскоре приступил к научным исследованиям в области оптики, проявив здесь огромный экспериментаторский талант и удивительную интуицию физика.

Ничего не зная об оптических исследованиях Юнга и располагая ничтожными экспериментальными средствами, Френель в 1815 году самостоятельно открыл принцип интерференции и объяснил на его основе все известные к тому времени явления интерференции и дифракции. В частности, он объяснил явление колец Ньютона и показал, что объяснение, данное этому явлению Ньютоном, находится в согласии с волновой теорией света, а интервал между двумя соседними «приступами» «наилегчайшего отражения или преломления» равен удвоенной длине волны.

В 1817 году, оставив службу инженера по ремонту мостов и дорог, Френель поселился в Париже и здесь, в лаборатории Политехнической школы, продолжил и завершил свои замечательные исследования сложнейших оптических явлений. В результате напряженной деятельности

---

[1] Этьен Луи Малюс (1775—1812) — французский физик, в 1811 г. открыл явление поляризации света при отражении.

Френель в 1819 году создал полную теорию дифракции, в которой, как и в других своих оптических исследованиях, пошел несравненно дальше Юнга [1]. В основу своей теории дифракции Френель положил принцип интерференции и принцип Гюйгенса (см.), который он существенно дополнил утверждением о когерентности различных участков луча, исходящего из одной светящейся точки, и введением так называемых «зон Френеля» [2]. Исходя из этих принципов, Френель мог объяснить прямолинейное распространение света при открытом (т. е. незадиафрагмированном) источнике, что до того времени было ахиллесовой пятой волновой гипотезы. Он впервые ввел математический метод описания дифракционных явлений при помощи так называемых интегралов Френеля. На конкурсе, объявленном в 1819 году Парижской академией наук, сочинение Френеля о дифракции света получило первую премию и в 1826 году было опубликовано в трудах Академии.

Вторым крупнейшим достижением Френеля было открытие им поперечности световых волн. К этой мысли он пришел еще в 1816 году, когда вместе с французским ученым Д.-Ф. Араго обнаружил, что лучи света, получающиеся в результате двойного лучепреломления и потому поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, не интерферируют, между тем как для продольных волн интерференция должна была бы иметь место. Приблизительно в это же время идею поперечности световых волн высказал Юнг. Однако он говорил лишь о «воображаемом поперечном движении», Френель же исходил из реальности поперечных световых колебаний. Он представлял себе луч света как распространяющиеся в пространстве упругие колебания некоторой материальной среды (эфира), совершающиеся в направлении, перпендикулярном направлению распространения луча.

На основе представлений о поперечности световых волн Френель сделал в 1823 году попытку построить первую математическую теорию взаимодействия света и вещества, т. е. вывести законы отражения, преломления, двойного лучепреломления и т. д.

В этом же году Френель открыл явление эллиптической и круговой поляризации света и впервые объяснил на этой основе сложнейшие оптические явления — хроматическую поляризацию и вращение плоскости поляризации.

Победа волновой теории света была завершена в работах Френеля по кристаллооптике. Френель объяснил на основе этой теории одно из наиболее сложных оптических явлений — двойное лучепреломление в

---

[1] Интересно заметить, что во всех оптических проблемах того времени Юнг как человек больших и разносторонних дарований опережал Френеля, высказывая раньше него многие верные идеи. Однако эти высказывания Юнга были большей частью гениальными предположениями, которые автор не пытался основательно доказать. Френель, напротив, нащупав, также с гениальной интуицией, верную мысль, не отступал до тех пор, пока эта мысль не получала прочного теоретического и экспериментального обоснования.

[2] «Зоны Френеля» — геометрическое построение, с помощью которого вычисляются результаты дифракции световых волн (в настоящее время также звуковых и радиоволн) на краях экранов.



Огюстен Жан Френель

двуосных кристаллах [1]. Он показал, что оба луча здесь являются «необыкновенными», т. е. не подчиняются обычным законам преломления, и вывел уравнения сложной волновой поверхности света, распространяющегося в двуосном кристалле.

В 1832 году, исходя из формы волновой поверхности, данной Френелем, английский математик У. Р. Гамильтон (1805—1865) теоретически предсказал тончайший оптический эффект в двуосных кристаллах — коническую рефракцию, которую затем на опыте в 1833 году получил английский физик Г. Ллойд (1800—1881). Несколько позже, в 1850 году, ярким и решающим подтверждением волновой теории света явились опыты Фуко, который впервые измерил скорость света в воде и показал, что она меньше, чем в воздухе, а это противоречило основным выводам корпускулярной теории света Ньютона.

Появление в начале XX века теории квантов дополнило оптику принципиально новыми понятиями, возродив на новой основе корпускулярные представления о природе света. Однако этими новыми открытиями не были уничтожены и волновые представления, неотделимые от таких явлений, как интерференция и дифракция. Установление двойственной природы света служит ярким примером глубокой диалектической противоречивости в явлениях окружающего нас мира.

Работы Френеля по созданию волновой теории света, тесно связанные с представлениями об упругих колебаниях, явились также мощным толчком к развитию теории упругости.

Последнее научное исследование Френеля относилось к проблеме увлечения светового эфира — гипотетической среды, в которой, как тогда считали, распространяются световые колебания. В XIX веке многие физики пытались теоретически и экспериментальным путем установить увлекается ли световой эфир движущейся Землею или остается неподвижным. — Френель высказал мысль о частичном увлечении эфира и вывел формулу изменения за счет этого скорости света. Выводы Френеля получили подтверждение в опытах французского физика Физо (1851 г.). В дальнейшем, однако, было установлено (1881 г.) постоянство скорости света — факт, который смогла объяснить лишь теория относительности Эйнштейна. В этой теории отвергалось само существование эфира и был, в частности, по-новому истолкован результат опыта Физо.

Научная деятельность Френеля проходила в тяжелых условиях. Всю жизнь он испытывал материальные затруднения и для осуществления дорогостоящих опытов вынужден был совмещать научные исследования со службой ради заработка. В Париже он служил инженером по усовершенствованию маяков. Однако и здесь, в области практической оптики, проявился большой талант Френеля. Он впервые применил в маяках изобретенные еще в 1788 году Бюффоном ступенчатые линзы, позволяющие производить сигнализацию на море чрезвычайно мощным и резко направленным лучом света.

---

[1] Двоякопреломляющие кристаллы, имеющие два направления (две главные оптические оси), вдоль которых луч света не раздваивается. Открыты в 1815 г. английским физиком Д. Брюстером.

Уже будучи членом Парижской академии наук (с 1823 г.), Френель вынужден был вести чрезвычайно изнурительную для него педагогическую работу, которая к осени 1824 г. окончательно подорвала и без того слабое здоровье Френеля. Между тем признание его важных научных заслуг становилось всемирным. Начало этому положило Лондонское королевское общество, избравшее в 1825 г. Френеля своим членом. Но весть о следующей почести, пришедшая из Англии же,— о присуждении ему высшей в Англии научной награды — Румфордовской медали (1827 г.)— застала Френеля уже при смерти. 14 июля 1827 г. угасла эта короткая жизнь «гения, который составил честь Франции и своего века», как писал о нем Дж. Гершель,— честь мировой науки, как можно с уверенностью сказать теперь, почти через полтора столетия после замечательных открытий Френеля.

ТРУДЫ О. Ж. ФРЕНЕЛЯ

Френель О. Ж. О свете. Мемуар. Пер. под ред. В. Фредерикс. М.—Л., Гос. изд., 1928. 160 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Кн. 18).

Френель О. Избранные труды по оптике. Пер. с франц. З. А. Цейтлина. Под ред. и с предисл. акад. Г. С. Ландсберга. М., Гостехиздат, 1955. 603 стр., илл. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

В настоящее издание включено двенадцать работ Френеля (кроме указанной выше) по важнейшим разделам его научной деятельности. Перевод сделан с полного собрания сочинений Френеля, изданного в Париже в 1866 году.

Содержание: Первый мемуар о диффракции света.— Выдержки из «Дополнений ко второму мемуару по диффракции света».— Записка по теории диффракции.— Доклад, сделанный г-ном Араго в Академии наук.— Мемуар о диффракции света, удостоенный премии Академии наук.— Мемуар о действии, которое оказывают друг на друга лучи поляризованного света.— Выдержки из мемуара «О расчете цветов, которые вызывает поляризация в кристаллических пластинках».— Мемуар о двойном преломлении.— Мемуар о законе модификаций, которые сообщаются отражением поляризованному свету.—Второй мемуар о двойном лучепреломлении.—Письмо Огюстена Френеля к Франсуа Араго относительно влияния движения Земли на некоторые оптические явления.— Работы, связанные с новой системой маячного освещения.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ О. Ж. ФРЕНЕЛЯ

Френель Огюстен Жан (1788—1827).— БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 586—587.

Огюстен-Жан Френель. Биографическая справка.— В кн.: Френель О.-Ж. О свете. М.—Л., Гос. изд., 1928, стр. 154—157.

Островский Б. Г. Памяти великого физика. К столетию со дня смерти Огюстена Жана Френеля (1788—1827).—«Вестник знания», 1927, № 21, стб. 1331—1334, портр.

Коган М. И. Френель и природа света.— «Наука и техника», 1938, № 16, стр. 12, портр.

Ландсберг Г. С. Огюстен Френель. Очерк жизни и деятельности.— В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. М., Гостехиздат, 1955, стр. 6—69, портр.

В широком очерке прослежено развитие работ Френеля по теоретической оптике. Рассмотрены основные проблемы его научной деятельности, начиная с 1817 года: исследование дифракции и интерференции световых волн, влияние поляризации на интерференцию, теория отражения и преломления, работы по кристаллооптике, работы по созданию новой системы маячного освещения и др. Показаны научные связи Френеля с его предшественниками и современниками.

* *
*

Араго Ф. Френель.— В кн.: Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Пер. Д. Перевощиков. Т. 2. Спб., 1860, стр. 67—123.

Биография Френеля, написанная его современником — выдающимся астрономом и физиком, с именем которого связаны важные исследования и открытия в области оптики.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 411—418.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 434—437; т. 2, стр. 130.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 173—187, 285—287; вып. 2, стр. 128—131 и др.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 248, 249.

Цейтлин З. А. Развитие воззрений на природу света.— В кн.: Томсон Дж. Дж. Электричество и материя. М.—Л., Гос. изд., 1928, стр. 132—171.

Френелю посвящена в этом очерке часть главы (стр. 139—144): Лаплас, Юнг, Френель.

Соминский М. С. Очерки по истории воззрений на природу света. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 83—86.

МАЙКЛ ФАРАДЕЙ

(1791—1867)

Великий английский физик, творец учения об электромагнитном поле Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 года в Ньюингтоне (предместье Лондона) в семье рабочего-кузнеца. Тринадцати лет Фарадей поступил учеником в переплетную мастерскую, где работал до 21 года. Он много читал, особенно увлекаясь книгами по физике и химии. В 1812 году Фарадей прослушал курс лекций знаменитого английского химика и физика Г. Дэви, и это окончательно решило его судьбу. Год спустя Фарадей уже был ассистентом в лаборатории Британского королевского института. Свои знания по физике и химии он существенно пополнил во время путешествия в качестве ассистента Дэви по Франции, Италии и Швейцарии (1813—1815 гг.). Молодой ученый встретился с известными физиками и химиками — Ампером, Гей-Люссаком и другими учеными, которые обратили внимание на его выдающиеся способности.

Возвратившись в Англию, Фарадей приступил к самостоятельным научным исследованиям. До 1821 года он занимался по преимуществу химией; в дальнейшем химичеокие открытия Фарадея чередовались с его открытиями в области физики.

В химии Фарадея привлекал широкий круг вопросов. Он разрабатывал общие методы химического исследования, получил два новых хлористых соединения углерода, впервые осуществил сжижение хлора (1824 г.), а затем и некоторых других газов. Большим достижением в органической химии явилось получение Фарадеем в 1825 году бензола. В эти же годы он совместно с английскими астрономами Д. Доллондом и Д. Гершелем изготовил новые сорта оптического стекла. Впоследствии в опытах с одним из этих сортов стекла Фарадей сделал замечательные физические открытия. Исключительное значение как для химии, так и для физики имели его исследования в области электролиза, о чем будет подробнее сказано ниже.

Свои знаменитые исследования по электромагнетизму Фарадей начал после открытия Эрстедом (1820 г.) взаимодействия электрического

тока и магнита. Большое влияние на общее направление работ Фарадея оказали электродинамическая теория Ампера и первые успехи нарождавшейся электротехники (изобретение Д.-Ф. Араго электромагнита и др.).

В 1821 году Фарадей впервые осуществил вращение магнита вокруг прямого проводника с током и проводника с током вокруг магнита. Таким образом, он впервые наблюдал превращение электрической энергии в механическую в виде длительного процесса (а не кратковременного импульса движения, какими были поворот магнитной стрелки в опыте Эрстеда или сближение и расхождение проводников с током у Ампера). Это была первая лабораторная модель электромотора.

Наглядно проявившаяся в этом опыте связь между электричеством и магнетизмом представлялась Фарадею чрезвычайно глубокой и настолько захватило его, что уже в 1821 году он поставил перед собою задачу — «превратить магнетизм в электричество». В течение ряда лет Фарадей настойчиво возвращался к этой проблеме и, наконец, 29 августа 1831 года открыл явление электромагнитной индукции — возникновения электродвижущей силы в проводнике (или электрического тока, если проводник замкнут) при относительном движении проводника и магнита. В короткое время Фарадей подробно изучил новое явление и установил основной закон электромагнитной индукции. Ему же принадлежит открытие и объяснение явления самоиндукции. В 1831 году сообщение Фарадея об этих открытиях было опубликовано в журнале Лондонского королевского общества и положило начало знаменитым сериям Фарадеевских работ, выходивших вплоть до 1885 года (уже после смерти ученого) под общим названием «Экспериментальные исследования по электричеству».

Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции, помимо того, что оно имеет огромное научное значение, стало основой грандиозного переворота в технике.

Явление электромагнитной индукции, равно как и обширный круг известных уже ранее явлений электростатики и электродинамики, Фарадей объяснил на основе разработанной им совершенно новой теории электрического и магнитного полей. Поле — электрическое и магнитное — Фарадей представлял себе как совокупность реально существующих силовых линий, которые заполняют все пространство между заряженными телами (электрические силовые линии), а также между проводниками с током и между магнитными полюсами (магнитные силовые линии). Фарадей не признавал возможности дальнодействия (мгновенного действия через пустоту на расстоянии). Электрические и магнитные действия он рассматривал как результат распространения от точки к точке продольных и поперечных натяжений силовых линий поля. Наиболее полно представления Фарадея о силовых линиях изложены в его работе «О физических линиях магнитной силы» (1851 г.).

Интерпретация силовых линий в дальнейшем сильно изменилась, однако, сам образ силовых линий прочно вошел в науку как чрезвычайно удобный метод описания электромагнитных явлений.

Об исключительно глубоком проникновении Фарадея в существо электромагнитных явлений говорит относящееся к 1832 году его выска-



Майкл Фарадей

зывание о колебательном характере и конечной скорости распространения электрических и магнитных сил [1].

На основании большого экспериментального материала Фарадей показал тождественность всех известных тогда видов электричества: электричества, возникающего при трении, гальванического электричества, термоэлектричества, животного электричества и «магнитного» электричества (индукционный ток). До работ Фарадея все эти явления считались различными по своей природе.

Стремясь вскрыть причину возникновения самого электрического напряжения в проводниках, Фарадей обратился к исследованию прохождения тока через растворы солей, щелочей и кислот в гальванических элементах. В 1833—1834 гг. эти исследования завершились установлением основных законов электролиза [2], показывающих, что существует строгое соответствие между количеством электричества, прошедшего через электролит, и количеством выделившегося на электродах вещества. Фарадей открыл, что прохождение одинакового количества электричества через электролит сопровождается выделением на электродах одного и того же числа грамм-эквивалентов любого химического вещества (1-й закон Фарадея) и что один грамм-эквивалент вещества выделяется при пропускании 96 500 кулонов [3] электричества (2-й закон Фарадея).

Огромное значение этих открытий Фарадея выявилось уже в ближайшие годы: в конце 30-х годов XIX века была изобретена гальванопластика (де ля Рив и в основном Б. С. Якоби), а в 40—50-е гг. Бунзен разработал способ производства лёгких металлов электролитическим путем. В настоящее время явление электролиза широко используется в научных исследованиях и технике: в электрохимии, электрометаллургии, гальванопластике и гальваностегии, при электрохимическом синтезе веществ и т. д.

В связи с открытием законов электролиза Фарадей высказал глубоко верную мысль о сродстве химических и электрических сил: «...атомы материи каким-то образом одарены электрическими силами или связаны с ними, и им они обязаны своими наиболее замечательными качествами и в том числе своим химическим сродством друг с другом» [4]. Развивая эту мысль Фарадея и опираясь на его работы по электролизу, физики уже значительно позднее, в 70—80-е годы XIX века, пришли к фундаментальному выводу о существовании элементарных количеств электричества (Г. А. Лоренц, Гельмгольц, Д. Стоней, Дж. Дж. Томсон) и об электрической природе вещества (Г. А. Лоренц).

К первому периоду творчества Фарадея (до 1841 г.) относится еще одно важное исследование, проведенное им в 1835—1838 гг.: исследование

---

[1] Высказывание это содержится в письме Фарадея от 1832 г., найденном в конце 1930-х годов в Архиве Лондонского королевского общества (см. «Известия Акад. наук СССР. Отд-ние техн. наук», 1938, № 5, стр. 122).

[2] Этот термин, как и вся современная терминология, относящаяся к явлению электролиза (электролит, электрод, ион, анион, катион и т. д.), принадлежит Фарадею.

[3] Так называемое «число Фарадея».

[4] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 1. М., 1947, стр. 335.

взаимодействия неподвижных зарядов в диэлектрической среде и объяснение в связи с этим поляризации диэлектриков.

После четырехлетнего перерыва, связанного с нервным заболеванием на почве умственного перенапряжения, Фарадей в 1845 году вновь вернулся к научным исследованиям.

В этот второй период научной деятельности, исследуя влияние магнитных и электрических сил на оптические явления в веществе, Фарадей в опытах с «тяжелым стеклом» сделал два новых замечательных открытия. В сентябре 1845 года он открыл вращение плоскости поляризации луча в магнитном поле и тем самым впервые экспериментально установил связь между светом и магнетизмом. В декабре того же года Фарадей сообщил об открытии им диамагнетизма [1] — явления, при котором тело не притягивается, а отталкивается от полюсов магнита. Стержень из такого вещества (диамагнетика), свободно подвешенный между полюсами магнита, устанавливается не вдоль силовых линий, как обычные магнетики, а перпендикулярно к ним. Как показал Фарадей, диамагнетиками является подавляющее число веществ в природе. Теорию диамагнетизма дал в 1905 году выдающийся французский физик Поль Ланжевен.

Экспериментальные открытия Фарадея быстро принесли ему широкую известность. В 1824 году он был избран в члены Лондонского королевского общества. В 1825 году Фарадей сменил Г. Дэви на посту директора лабораторий Британского королевского института, а еще через два года стал профессором химии в этом институте. В 1833 году ему была пожизненно передана чрезвычайно почетная в Англии так называемая Фуллеровская профессура по химии. Всемирное признание пришло к Фарадею после открытия электромагнитной индукции. К концу своей жизни Фарадей состоял членом многих десятков научных обществ.

Однако новые физические идеи Фарадея воспринимались современниками с большим трудом. Значение их впервые раскрыл Максвелл. Окончательное и полное признание теория электромагнитного поля Фарадея—Максвелла получила после знаменитых работ Генриха Герца.

Вся научная деятельность Фарадея была проникнута твердым убеждением в единстве сил природы, в существовании тесной взаимосвязи между явлениями и в возможности превращения одних форм энергии в другие. Еще в 1838 году Фарадей высказал мысль о существовании эквивалентов различных видов «сил»: «В дальнейшем мы, может быть, будем в состоянии сравнивать друг с другом корпускулярные силы ...силы тяготения, сцепления, электричество и химическое сродство, и тем или иным путем определять по их действиям их относительные эквиваленты...» [2]. В 1840 году, то есть еще до появления первой работы Роберта Майера, Фарадей, выступая против контактной теории гальванического электричества, допускавшей длительное течение тока лишь за счет контакта проводников из различных металлов, писал: «Мы имеем много процессов, при которых форма силы может претерпеть такие изменения,

---

[1] Термин принадлежит Фарадею.

[2] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 1. М., 1947, стр. 705.

что происходит явное *превращение* ее в другую... Но ни в одном случае, даже с электрическим угрем и скатом ., нет чистого сотворения силы; нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее» [1]. Таким образом, Фарадей по существу одним из первых дал формулировку закона сохранения и превращения энергии [2]. Однако в отличие от Майера и других физиков (Джоуля и Гельмгольца), которым справедливо приписывается честь установления этого закона, Фарадей не предпринимал специальных исследований в этом направлении.

Последние семь лет своей жизни Фарадей тяжело болел и не занимался научной деятельностью. Умер Фарадей 25 августа 1867 года в Хэмптоне (район Лондона) и был с почетом похоронен на Хайгетском кладбище в Лондоне.

ТРУДЫ М. ФАРАДЕЯ

Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 1—2. Коммент. и ред. чл.-корр. АН СССР проф. Т. П. Кравца. М., 1947—1951. (Акад. наук СССР. Классики науки).

Т. 1. Пер. с англ. Е. А. Чернышевой и Я. Р. Шмидт-Чернышевой. 1947. 848 стр., илл.; 2 л. портр.

Т. 2. Пер. с англ. А. В. Яковлевой, 1951. 538 стр., илл.; 1 л. портр.

В двух томах воспроизведены восемнадцать серий «Экспериментальных исследований по электричеству», представляющих собою доклады Фарадея, сделанные им в разное время в заседаниях Лондонского королевского общества и затем напечатанные в «Philosophical Transactions». Во второй том автор включил, кроме того, ряд статей (28) по многим вопросам теории электричества. Историческое значение этого труда Фарадея освещено в статьях Т. П. Кравца, помещенных в конце первого и второго томов «Экспериментальных исследований».

Третий том «Экспериментальных исследований» находится в печати.

Фарадей М. Избранные работы по электричеству. Пер. под ред., с биогр. очерком и примеч. З. А. Цейтлина. М.—Л., ГОНТИ. Ред. техн.-теорет. лит., 1939. 304 стр., илл.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Физика. Механика. Математика. Астрономия).

Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. (Отрывки из одиннадцатой, двенадцатой, тринадцатой, четырнадцатой и девятнадцатой серии исследований).— В кн.: 50 лет радио. Вып. 1. Из предистории радио. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 35—52.

Фарадей М. О физических линиях магнитной силы.— В кн.: 50 лет радио. Вып. 1. Из предистории радио. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 58—62.

Фарадей М. История свечи. Пер. с англ. Е. Н. Драгуновой. Под ред. М. П. Шаскольской. М., Детгиз, 1956. 111 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Знаменитая книга, впервые появившаяся более ста лет тому назад и переведенная почти на все языки мира.

---

[1] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 1. М., 1947, стр. 150.

[2] Еще раньше, в 1832 г., этот закон был сформулирован Сади Карно, что стало известным лишь в 1878 г.

Миткевич В. Ф. Фарадей.—БСЭ, т. 56, 1936, стр. 613—618.

Баумгарт К. К. Фарадей Майкл.— БСЭ, 2-е изд., т. 44, 1956, стр. 525—526.

Цейтлин З. А. Михаил Фарадей. Краткий биографический очерк.— В кн.: Фарадей М., Избранные работы по электричеству. М.—Л., ГОНТИ. Ред. техн.-теорет. лит., 1939, стр. 281—304.

Воеводин П. И. Михаил Фарадей. М.—Л., Гос. науч.-техн. изд., 1931. 54 стр. с илл. и портр. (Орг. ком. по проведению чествования памяти Михаила Фарадея. К 100-летию открытия закона электромагнитной индукции).

Радовский М. И. Михаил Фарадей. Биографический очерк. М.—Л., Госэнергоиздат, 1946. 72 стр.

Радовский М. И. Фарадей. М., «Молодая гвардия», 1936. 176 стр.; 6 л. илл. и портр. (Жизнь замечательных людей. Вып. 19—20).

Наиболее крупная на русском языке биография Фарадея, написанная для широких кругов читателей.

* *
*

Абрамов Я. В. М. Фарадей, его жизнь и научная деятельность. Биографический очерк. М., 1892. 80 стр.; 1 л. портр. (Жизнь замечат. людей. Биогр. б-ка Ф. Павленкова).

Оствальд В. Михаил Фарадей. Пер. с нем. Пг., «Сотрудничество», 1919. 64 стр. (Биогр. б-ка).

То же в кн.: Оствальд В. Великие люди. Пер. с 2-го нем. изд. Г. Кваша. [Спб.], 1910, стр. 96—144.

* *
*

Тиндаль Дж. Фарадей и его открытия. Воспоминания Дж. Тиндаля. С портр. Фарадея и прибавлениями Г. Гельмгольца. Спб., 1871. II, 200 стр.

Одна из наиболее замечательных книг в литературе о Фарадее, написанная его другом, известным физиком и талантливым популяризатором науки (1820—1893). Несмотря на всю неудовлетворительность перевода, выполненного почти 90 лет тому назад, книга и сегодня читается с самым живым интересом. Многолетнее общение и беседы с Фарадеем позволили автору воссоздать прекрасный образ его друга — ученого, мыслителя, человека.

«Воспоминания» Тиндаля о Фарадее — одна из тех книг, которые, как говорит Максвелл, «донесли историю его жизни до миллионов людей».

Максвелл Д. К. Фарадей.— В кн.: Максвелл Д. К. Речи и статьи. Пер. под ред. В. Ф. Миткевича. М.—Л., Гостехиздат, 1940, стр. 71—77 и 210—218.

Под этим названием Максвелл опубликовал две статьи, характеризующие Фарадея как ученого и человека. Первая из них напечатана в сентябрьском журнале «Nature» за 1873 год, вторая была написана для «Британской энциклопедии».

По определению Максвелла, «Фарадей является и навсегда останется творцом того общего учения об электромагнетизме, которое рассматривает с единой точки зре-

ния все явления, изучавшиеся прежде в отдельности, не говоря уже о тех явлениях, которые открыл сам Фарадей, следуя своему убеждению о единстве всей науки».

Вавилов С. И. Михаил Фарадей.— В кн.: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 132—134.

На немногих страницах высказан ряд замечательных мыслей о научном творчестве Фарадея. Это творчество «показывает, что истинное научное открытие всегда рано или поздно врастает в технику и вместе с тем служит основой дальнейшего развития науки». Автор говорит далее о том, что не менее поучителен для нас метод работы Фарадея. «Необычайная простота Фарадея, уменье мыслить и излагать свои мысли так, чтобы стать понятным каждому,— это то, чего мы хотим вообще в науке».

* *
*

Гельмгольц Г. Современное развитие взглядов Фарадея на электричество.— В кн.: Гельмгольц Г. Популярные речи. Пер. под ред. О. Д. Хвольсона и С. Я. Терешина. Ч. 1. Спб., К. Л. Риккер, 1896, стр. 103—145.

Речь в память Фарадея на торжественном заседании Лондонского химического общества 5 апреля 1881 года.

Эта же речь вышла под названием:

Гельмгольц Г. Фарадеевская речь. Современное развитие фарадеевских воззрений на электричество... Пер. В. Тюрина. Спб., 1898. 50 стр.

Дюма Ж.-Б.-А. Памяти Фарадея. — В кн.: Из истории физики XIX столетия. Очерки трудов ее выдающихся деятелей. Михаил Фарадей. М., Н. Маракуев, 1897, стр. 5—58, портр.

Речь, произнесенная в публичном заседании Французской Академии наук 18 мая 1868 года ее непременным секретарем — знаменитым химиком Дюма (1800—1884). В глубокой по содержанию и блестящей по форме речи Дюма характеризует методы работы Фарадея, говорит о его выдающихся заслугах, о его человеческих качествах. «Я взялся изобразить перед вами жизнь Фарадея — ученого, даровитейшего из всех, кого только имела Академия... Я не знал человека, более достойного любви, удивления... Не один полезный урок можно почерпнуть, беспристрастно изучая этого знаменитого человека...».

Миткевич В. Ф. Работы Фарадея и современное развитие приложений электрической энергии. М., Гостехиздат, 1932. 19 стр.

Доклад на II Международном конгрессе по истории науки и техники, состоявшемся в Лондоне в июне—июле 1931 года.

Миткевич В. Ф. Работы Фарадея в области электромагнитной индукции в связи с его общими физическими воззрениями.— В кн.: Миткевич В. Ф. Основные физические воззрения. Сборник докладов и статей. Изд. 3-е, доп. М.—Л., Акад. наук СССР, 1939, стр. 7—15.

Речь на торжественном заседании Академии наук СССР 22 ноября 1931 года в связи с исполнившимся столетием со дня открытия электромагнитной индукции. Фарадей характеризуется в докладе как «лучший образец того, чем должна быть физическая мысль. Он был физик-мыслитель в самом высоком значении этого слова».

Эта речь напечатана в № 12 журнала «Природа» за 1931 год (стр. 1155—1170), а также в упомянутой выше книге акад. В. Ф. Миткевича «Работы Фарадея и современное развитие приложений электрической энергии» (стр. 9—15).

Тамм И. Е. Основные идеи Фарадея и их роль в развитии науки об электричестве.— «Электричество», 1931, № 23—24, стр. 1321—1326.

Тамм И. Е. Руководящие идеи в творчестве Фарадея. (К столетию открытия электромагнитной индукции).—«Успехи физ. наук», 1932, т. 12, вып. 1, стр. 1—30.

Кравец Т. П. Фарадей и его «Экспериментальные исследования по электричеству.— В кн.: Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М., Акад. наук СССР, т. 1, 1947, стр. 733—780; т. 2, 1951, стр. 407—422.

Нейман Л. Р., Рахимов Г. Р. и **Янко-Триницкий А. А.** К 125-летию открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции.— «Электричество», 1956, № 8, стр. 80—82.

Руководящие идеи в научном творчестве Фарадея и их влияние на все последующее развитие электроэнергетики и науки об электричестве.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 433—461.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 110—112, 260—263, 351—355 и др. (см. именной указатель).

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 253—283; вып. 2, стр. 125—126, 155—156, 177, 391—393 и др. (см. именной указатель).

Брэгг В. Г. История электромагнетизма. Пер. с англ. М. П. Шаскольской. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 15—32.

В сжатом очерке приводятся важнейшие факты из истории экспериментальных исследований Фарадея.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 195, 198, 200, 204, 214, 220 и др. (см. именной указатель).

* *
*

Здесь указана далеко не вся литература о Фарадее на русском языке.

Более полно материал этот представлен в специальной библиографии по Фарадею (см. ниже).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Лукомская А. М. Библиографический указатель печатных трудов Михаила Фарадея и основной литературы о его жизни и деятельности. — В кн.: Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 2. М., Акад. наук СССР, 1951, стр. 437—515.

Указатель состоит из следующих частей: 1. Печатные труды М. Фарадея. 2. Письма и дневники М. Фарадея, опубликованные в печати после 1867 г. 3. Основная биографическая литература о М. Фарадее на русском и иностранном языках (1838—1949). 4. Библиография М. Фарадея (перечень изданий, содержащих библиографию трудов Фарадея). Приложения: 1. Сведения о лекциях, прочитанных М. Фарадеем. 2. Перечень использованных источников.



САДИ КАРНО

(1796—1832)

Сади Карно родился 1 июня 1796 года в Париже и получил блестящее математическое и инженерное образование в знаменитой Политехнической школе (1812—1814). Пробыв пять лет в армии (в инженерных войсках), он в 1819 году уехал в Магдебург к отцу — известному ученому и выдающемуся политическому деятелю Французской революции конца XVIII века Лазару Карно, жившему в это время в изгнании. В 1823 году Карно-сын возвратился в Париж, где оставался до конца жизни.

Сади Карно был яркой, всесторонне одаренной личностью. Увлечение искусством, в частности, музыкой, интерес к политической экономии, занятия спортом сочетались в нем с глубокой любовью к естественным наукам — математике, химии, биологии и особенно к физике, в которую он, несмотря на свою короткую жизнь, внес вклад, достойный гения.

Научные занятия Карно начал еще в армии. В 1828 году он в чине капитана инженерных войск оставил военную службу, чтобы с большей полнотой заняться исследованиями в области физики. Тяжелая болезнь неожиданно оборвала эту замечательную жизнь в самом ее расцвете. Карно умер 24 августа 1832 года, прожив немногим более 36 лет.

В 1824 году в Париже вышло его единственное опубликованное при жизни научное сочинение — «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

В начале XIX века все большее значение в технике приобретали паровые двигатели, однако их теории не существовало. Сам Карно писал об этом: «Несмотря на работы всякого рода, предпринятые относительно паровых машин, несмотря на удовлетворительное состояние, в которое они теперь приведены, их теория весьма мало подвинута, и попытки их улучшить почти всегда руководились случаем» [1]. Продолжали оставаться открытыми такие важнейшие вопросы, как: существует ли граница, даль-

[1] Карно С. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу.— В кн.: Второе начало термодинамики. М.—Л., ГТТИ, 1934, стр. 19.



Сади Карно

ше которой улучшать тепловой двигатель невозможно; нет ли, в частности, рабочего тела, более выгодного, чем водяной пар, применявшийся до тех пор в тепловых двигателях, иначе говоря, зависит ли работоспособность тепловой машины от природы рабочего тела (пар, газ и др.).

Чтобы ответить на эти вопросы, Карно поставил перед собою задачу — на основе наиболее общих физических законов установить общие принципы работы не только парового, но и любого теплового двигателя. Эту задачу он блестяще разрешил.

Карно впервые отчетливо провозгласил в качестве наиболее общего принципа действия теплового двигателя положение, согласно которому движущая сила в тепловой машине возникает лишь при переходе тепла от более нагретого тела (нагревателя) к менее нагретому телу (холодильнику), т. е. лишь за счет выравнивания нарушенного каким-то образом теплового равновесия в машине. И обратно: чтобы перенести тепло от менее нагретого к более нагретому телу, необходимо совершить механическую работу. Он установил предел возможного улучшения теплового двигателя. Так как в тепловом двигателе работа (движение поршня) совершается за счет температурного расширения рабочего тела (пар, газ), то, как утверждал Карно, максимальную полезную работу даст такая тепловая машина, в которой всякое изменение температуры будет происходить лишь от изменения объема. Все другие изменения ее бесполезны. Примерами бесполезного изменения температуры служат нагревание частей машины за счет трения, выравнивание температур различных частей машины (например, нагревателя и холодильника) при их непосредственном соприкосновении. Исходя из принципа, устанавливающего невозможность создания вечного двигателя, который мог бы работать без получения энергии извне (так называемый вечный двигатель 1-го рода), иначе говоря, исходя по существу из принципа сохранения энергии, Карно доказал, что к. п. д. тепловой машины не зависит от природы рабочего тела и определяется лишь разностью температур нагревателя и холодильника. Этот последний вывод, лежащий в основе современной теплотехники, в дальнейшем получил название принципа Карно.

Карно впервые разработал также схему идеального теплового двигателя, в котором осуществляются условия возникновения максимальной движущей силы, т. е. который работает с максимальным коэффициентом полезного действия. Он установил, что таким будет тепловой двигатель, в котором осуществляется найденный им замкнутый круговой процесс, получивший позднее наименование цикла Карно. Цикл Карно состоит из четырех последовательных изотермических и адиабатических расширений и сжатий рабочего тела. Температурные изменения в нем происходят только от изменения объема. В цикле Карно полезная работа получается за счет того, что расширение рабочего тела идет при более высокой температуре, чем сжатие. Открытия Карно впервые указывали правильные пути развития тепловой техники. Более того, утверждая, что в любом тепловом двигателе полезная механическая работа может быть получена лишь при переходе тепла от *более* нагретого к *менее* нагретому телу, Карно впервые высказал идею одного из основных принципов физики — второго начала термодинамики.

Гениальное сочинение Сади Карно далеко не сразу получило известность. Его опубликование в 1824 году (в виде брошюры, изданной на личные средства автора) прошло незамеченным. Спустя 10 лет на работу Карно обратил внимание известный французский физик Клапейрон; в 1834 году он изложил работу Карно «Размышления о движущей силе огня» (в статье того же названия) более привычным для физиков нового времени языком аналитических и графических обозначений (у Карно все соотношения выражены словами). Всемирное признание идеи Карно получили лишь в конце 50-х гг. XIX века, когда они были развиты выдающимися физиками Р. Клаузиусом и У. Томсоном (Кельвином).

Карно в своем сочинении пользовался понятием теплорода как носителя тепла. Работа в тепловом двигателе, согласно Карно, совершается за счет перехода теплорода с более высокого уровня (от нагревателя) на менее высокий уровень (к холодильнику), подобно работе водяной мельницы, и зависит только от разности этих уровней (разности температур — принцип Карно). Общее же количество теплорода при этом, как утверждал Карно, не меняется, т. е. тепло не расходуется в машине. Клаузиус, а также Томсон, опираясь на новую, механическую теорию теплоты, показали, что часть теплоты в тепловом двигателе неизбежно расходуется, превращаясь в механическую работу, и что неизменной в идеальном тепловом двигателе остается общая энергия (тепловая плюс механическая) машины и источников внешней силы.

В 1878 году брат Сади Карно, Ипполит Карно, в новом издании «Размышлений о движущей силе огня» опубликовал обнаруженные после смерти ученого заметки и выдержки из дневника последних лет жизни Сади Карно [1], в которых он не только выступал с позиции механической теории теплоты, но и впервые дал по существу современную формулировку закона сохранения и превращения энергии. Он писал: «Тепло не что иное, как движущая сила или, вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратно: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила.

Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, т. е. вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает» [2].

Карно впервые вычислил и значение механического эквивалента тепла, получив в результате величину 370 *кГм/ккал* (современное значение 427 *кГм/ккал*).

К сожалению, эти высказывания и вычисления Карно стали известными лишь через 46 лет после смерти их автора, когда закон сохранения

---

[1] Многие бумаги С. Карно, умершего от холеры, были сожжены вместе с его вещами.

[2] В кн.: Второе начало термодинамики. М.—Л., ГТТИ, 1934, стр. 62—63.

и превращения энергии уже был окончательно установлен в трудах Роберта Майера (1842 г.), Джоуля (1843 г.) и Гельмгольца (1847 г.) и когда механическая теория теплоты получила всеобщее признание. Однако эти научные записки Сади Карно позволили в еще большей мере увидеть и оценить всю мощь ума великого физика и с полной уверенностью назвать его родоначальником термодинамики.

ТРУДЫ С. КАРНО

Карно С. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. Пер. С. Э. Фриша. Под ред. и с примеч. В. Р. Бурсиана и Ю. А. Круткова. М.—Пг., Гос. изд., 1923. 80 стр. (Классики естествознания. Кн. 7).

То же в кн.: Второе начало термодинамики. Под ред. и с предисл. А. К. Тимирязева. М.—Л., ГТТИ, 1934, стр. 15—61.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ С. КАРНО

Предводителев А. С. Карно Сади Никола Леонар. (1796—1832).— БСЭ, т. 31, 1937, стб. 597—598.

Карно Никола Леонар Сади. (1796—1832).— БСЭ, 2-е изд., т. 20, 1953, стр. 234, портр.

Лагунов Г. Л., Сади Карно.— «Техн.-экон. вестник», 1926, т. 6, № 12, стр. 749—751.

Фрадкин Л. З. Сади Карно. Его жизнь и творчество. К 100-летию со дня смерти (1832—1932 гг.). М.—Л., Энергоиздат, 1932. 56 стр., портр.

Книга состоит из четырех глав: Биография Сади Карно.— Термодинамика XVIII и первых лет XIX в.— Учение Сади Карно.— Цикл Карно и паровые двигатели.

Радциг А. А. Сади Карно и его «Размышление о движущей силе огня».— В кн.: «Архив истории науки и техники», 1934, вып. 3, стр. 31—49.

Статья содержит краткий биографический очерк Карно и обстоятельный анализ его главного научного труда. Имея в виду содержание дневников Карно, автор указывает, что у Карно были все необходимые материалы для вывода и обоснования первого закона термодинамики.

Фрадкин Л. З. Историческая эволюция принципа Сади Карно.— «История техники», 1935, вып. 3, стр. 3—36.

Франкфурт У. И. Из истории второго начала термодинамики.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР, 1957, т. 19, стр. 564—602.

I. Сади Карно, стр. 564—582.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 399—401, 478.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 139—143, 157.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 171, 215—218.

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 249—253.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 183—185, 304, 307 и др. (по именному указателю).

ВИЛЬГЕЛЬМ ЭДУАРД ВЕБЕР

(1804—1891)

Немецкий физик-теоретик Вильгельм Эдуард Вебер родился 24 октября 1804 года в г. Виттенберге в семье профессора богословия. Окончив университет в г. Галле, он 22-х лет получил докторскую степень. Почти всю жизнь Вебер провел в Геттингене, где был профессором физики в университете (1831—1837 и 1849—1891). Здесь Вебер сблизился с великим немецким математиком и астрономом К. Гауссом (1777—1855), в тесном содружестве с которым Вебер вел научные исследования в течение нескольких лет. С 1843 по 1849 гг. Вебер был профессором физики в Лейпцигском университете. Умер Вебер 23 июня 1891 года в Геттингене, где ему и Гауссу поставлен общий памятник.

Первые научные исследования Вебера относятся к механике. Он экспериментально изучал волнообразное движение воды (1825 г.). В 1835 году, исследуя деформацию упругих тел, он открыл важное явление, названное им «упругим последействием» (законы его были установлены Ф. Кольраушем в 1863—1866 гг.). Это явление Вебер объяснял (с правильных атомно-молекулярных позиций) изменением движений всех молекул тела в результате действия на него деформирующей силы. К началу 30-х годов относятся также работы Вебера в области акустики.

Вместе с Гауссом Вебер занимался вопросами земного магнетизма. В 1833—1834 гг. обоими учеными при содействии А. Ф. Гумбольдта [1] была основана первая геомагнитная обсерватория, где Вебер и Гаусс открыли и в основных чертах изучили суточные колебания земного магнетизма. Результатом их исследований в этой области был первый «Атлас земного магнетизма».

Основные научные работы Вебера относятся к области электричества.

---

[1] А. В. Ф. Гумбольдт (1769—1859) — выдающийся немецкий естествоиспытатель, один из основоположников геофизики.

Крупнейшим вкладом в физику явилось создание им совместно с Гауссом абсолютной системы электрических и магнитных единиц. Идея установления специальных единиц для измерения величин, связанных с магнитными явлениями, принадлежала Гауссу. Вебер распространил эту идею на все электрические и в частности электродинамические явления. Эта система единиц — результат десятилетних исследований (1846—1856) — была опубликована Вебером в 1852—1856 гг. в серии его работ, которые выходили в Лейпциге с 1846 по 1878 гг. под общим названием „Elektrodynamishe Maasbestimmungen" (Электродинамические мерооопределения).

В абсолютной системе электрических и магнитных величин все единицы измерения выражены через три основные механические единицы — длины, времени и массы. В качестве основных единиц Вебер предложил 1 *мм*, 1 *сек.* и 1 *мг*. Позднее, в 1881 г., на Парижском конгрессе электриков было решено принять в качестве основных единиц абсолютной электромагнитной системы 1 *см*, 1 *сек.* и 1 *г*. На этом конгрессе были введены названия единиц в честь выдающихся физиков: ом, вольт, ампер, кулон, фарада. Имя основателя абсолютной системы единиц — Вебера не вошло в нее, так как уже до конгресса его именем была названа единица магнитного потока в практической системе.

Введение абсолютной системы электромагнитных единиц измерения сыграло чрезвычайно важную роль в науке и технике, так как сделало возможным точное количественное сравнение различных сил — электрических, магнитных и механических.

Большое значение имели также работы Вебера по дальнейшему развитию электродинамической теории Ампера. В 1846 году Вебер вывел общий закон взаимодействия элементарных количеств электричества, впервые учитывавший относительное движение взаимодействующих количеств электричества (закон Вебера).

В основу выведенного им закона Вебер положил чисто эмпирический частный закон Ампера для взаимодействия электрических токов. Вебер рассматривал электрический ток как двойной поток — навстречу друг другу — положительных и отрицательных элементарных количеств электричества. Проанализировав взаимодействие этих частиц, он получил общий закон, гласивший: сила взаимодействия между двумя элементарными количествами электричества зависит не только от самих количеств электричества и расстояния между ними, но и от их относительного движения, а именно от скорости и ускорения этого движения.

Закон Вебера охватывал как электростатические взаимодействия элементарных количеств электричества, так и электродинамические взаимодействия токов и магнитов, переходя в первом случае в закон Кулона, во втором — в закон Ампера и Неймана. Вебер вывел из своего закона и общий закон индукции токов.

Полученные им результаты были опубликованы в 1846 году в той же серии работ «Elektrodynamishe Maasbestimmungen».

Открытие закона Вебера вносило коренные изменения в понимание самой природы сил притяжения и отталкивания. Со времен Ньютона счита-



Вильгельм Эдуард Вебер

лось, что эти силы зависят только от масс взаимодействующих тел (или — позже — от величины взаимодействующих зарядов) и расстояния между ними. Теперь же оказалось, что эти силы зависят еще от скорости и ускорения относительного движения взаимодействующих объектов. Закон Вебера в течение нескольких десятилетий считался основным законом электродинамики. Следует, однако, отметить, что общие теоретические позиции, на которых стоял Вебер,— допущение взаимодействия электрических зарядов на расстоянии без участия какой бы то ни было промежуточной среды — были неправильными. Эти представления приводили к тому, что ряд важнейших электромагнитных явлений, связанных с процессами в пространстве между электрическими зарядами (т. е. с изменением электромагнитного поля), оставался совершенно вне поля зрения исследователей. В 1856 г. Вебер (совместно с Кольраушем) измерил так называемую электродинамическую постоянную, входящую в его уравнение (и численно равную отношению электромагнитной и электростатической единиц заряда), и обнаружил поразительное сходство этой величины со скоростью света. Однако он не сделал из этого каких-либо выводов, хотя этот факт еще раз подтверждал уже неоднократно высказанные (Эрстед, Фарадей) идеи о связи света с электромагнетизмом. Несколько позже Максвелл установил, что скорость света действительно должна быть в точности равна отношению электромагнитной и электростатической единиц заряда.

В 60-е — 80-е годы XIX века Вебер один из первых высказал идею электрического строения вещества. Он полагал, что в основе всех веществ лежат частицы положительного и отрицательного электричества и что вещества состоят из атомов, которые представляют собою различные совокупности равного числа тех и других, а потому нейтральны. При этом Вебер впервые в истории науки предложил планетарную по своему существу модель строения атома, согласно которой атом вещества состоит из тяжелого (у Вебера — отрицательно заряженного) ядра и обращающихся вокруг него, подобно планетам вокруг Солнца, легких положительных частиц. Он считал, что легкие частицы могут вылетать из атома, т. е. что атом делим — мысль для того времени очень смелая. На основе этих представлений он объяснил явления теплопроводности (как перенос тепла «свободными», легкими заряженными частицами) и выделения джоулева тепла в электрической цепи.

Вебер высказал также ряд глубоко верных догадок об электрической природе магнетизма. Он видел причину явления намагничивания в ориентировке «электрических» атомов. Один из первых он пытался объяснить явление диамагнетизма электромагнитной индукцией в атомах.

Эти важные работы Вебера по теории строения вещества и электричества впоследствии были совершенно забыты. В качестве первых авторов гипотезы об атомах электричества в историю науки вошли Д. Стоней, Гельмгольц, Д. Томсон, Г. А. Лоренц. Между тем, нельзя забывать, что уже Вебер высказал глубокие идеи в этой области.

Вебер изобрел также ряд физических приборов: первый в Германии электромагнитный телеграф (1833 г.), совместно с Гауссом, независимо от

Шиллинга[1]; точный электродинамометр (1846), позволивший Веберу экспериментально проверить закон Ампера и законы индукции; чувствительный магнитный индуктор, с помощью которого можно было обнаружить токи, наведенные при движении проводника в магнитном поле Земли.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В. Э. ВЕБЕРА

Вебер Вильгельм Эдуард. (1804—1891).— БСЭ, 2-е изд., т. 7, 1951, стр. 79—80.

Вильгельм Вебер. (Страничка из истории физики). Подпись: П. Э.— «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1901, № 311, стр. 260—263.

Бачинский А. И. Вильгельм Вебер — творец электронной теории. — «Природа», 1916, № 10, стб. 1115—1130.

Заслугам Вебера по созданию индуктивного телеграфного аппарата посвящена статья:

К столетию со дня рождения Вильгельма Эдуарда Вебера. — «Почтово-телегр. журн.». Отдел неофиц., 1904, дек., стр. 1155—1156.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 501, 503—511.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 353—357. Т. 2, стр. 206—209, 338.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 1, стр. 240—249; вып. 2, стр. 161—165, 170—177, 380—386 и др. (см. именной указатель).

Даннеман Ф. История естествознания. Т. 3, стр. 278—281.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 263, 285—287 и др.

[1] Впервые электромагнитный телеграф изобрел известный электротехник П. Л. Шиллинг в России в 1832 г. (год первого публичного его показа).

ЭМИЛИЙ ХРИСТИАНОВИЧ ЛЕНЦ

(1804—1865)

Эмилий Христианович Ленц вошел в историю русской и мировой науки прежде всего как выдающийся физик-экспериментатор. Его работы по электромагнетизму и электрохимии, имеющие сами по себе большое значение, явились вместе с тем важными звеньями в той цепи научных открытий, которые подготовили окончательное установление фундаментального закона природы — закона сохранения и превращения энергии. Не меньшая заслуга принадлежит Ленцу и в разработке теоретических основ современной электротехники.

Э. Х. Ленц родился 24 февраля 1804 года в г. Дерпте (ныне Тарту, Эстонская ССР). Шестнадцати лет он поступил на богословский факультет Дерптского университета. Однако уже в годы учения Ленц проявил такой большой интерес и такие способности к физике, что еще до окончания университета был приглашен принять участие в экспедиции, которая под руководством известного путешественника О. Е. Коцебу отправлялась в 1823 году в кругосветное плавание. В 1826 году Ленц возвратился с обширным научным материалом по геофизике. Результаты обработки этого материала оказались чрезвычайно ценными, что послужило поводом к избранию молодого ученого в 1828 году адъюнктом Петербургской академии наук. В 1829—1830 гг. Ленц участвовал в геофизических экспедициях по Кавказу и побережью Каспийского моря. В 1830 году он был избран экстраординарным, а четыре года спустя — ординарным академиком Петербургской академии наук.

К занятиям геофизикой и физической географией Ленц возвращался и в дальнейшем, но основной областью его деятельности с 1832 года становится физика. В этом году Ленц начал исследования по электромагнетизму. Повторив и проанализировав опыты Эрстеда и Ампера над взаимодействием тока и магнита и взаимодействием токов, а также опыты Фарадея по электромагнитной индукции, Ленц сформулировал правило для определения направления индуцированного (наведенного) тока в зависи-



Эмилий Христианович Ленц

мости от движения проводника в магнитном поле. В отличие от существовавших ранее формулировок, имевших чисто геометрический смысл, правило это в формулировке Ленца впервые вскрыло глубокий физический смысл связи между возникающим электрическим током и механическим движением проводника. Оно содержало в себе идею сохранения и превращения энергии, свидетельствуя, что электрическая энергия не возникает из ничего, а появляется за счет механической энергии, которая сама при этом уменьшается (замедление первоначального движения проводника).

В современной формулировке «правило Ленца» учитывает и электромагнитную индукцию в проводнике при замыкании или размыкании другого проводника (с током), расположенного вблизи первого. Объединяя оба эти случая, оно гласит, что наведенная в проводнике э. д. с. возникает за счет уменьшения тех изменений окружающего магнитного поля, которые вызывают ее появление. Результаты этих работ Ленц изложил в докладе «Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией» (1833 г.). «Правило Ленца» широко используется в физике и теоретической электротехнике при всех расчетах, связанных с проявлением электромагнитной индукции.

В 1833 году Ленц точными опытами подтвердил закон Ома, в то время вызывавший у многих физиков серьезное недоверие. В процессе этой работы Ленц обнаружил, что теплота, выделяющаяся в проводнике при прохождении по нему тока, обратно пропорциональна проводимости проводника. Однако серьезно заняться вопросами теплового действия тока Ленц смог лишь в конце 30-х — начале 40-х годов, когда был сконструирован источник тока, обеспечивавший достаточное постоянство тока (батарея Даниэля), и усовершенствованы приборы для измерения силы тока и сопротивления проводника. К этому же времени Ленц изобрел специальный очень точный прибор для измерения выделяющейся в проводнике теплоты. Узнав о вышедшей в 1841 году работе Джоуля, в которой был сформулирован закон теплового действия тока, выведенный, однако, на основании всего лишь нескольких измерений, Ленц не прекратил своих исследований. На большом экспериментальном материале он проверил и подтвердил этот закон, устранив, таким образом, все сомнения в его достоверности. Исследования Ленца были опубликованы в его работе «О законах выделения тепла гальваническим током» (1843—1844). Закон теплового действия тока, исключительно важный для физики и электротехники, справедливо вошел в историю науки как закон Джоуля —Ленца. Показывая, что определенное количество электричества может вызвать выделение в проводнике определенного количества тепла, он является яркой иллюстрацией универсальности закона сохранения и превращения энергии.

В 1844 году Ленц открыл один из законов разветвленных токов. Он указал, что в параллельно соединенных участках разветвленной цепи, в которых имеются источники э. д. с., токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих участков. Через четыре года более общие законы разветвленных токов были сформулированы Кирхгофом.

К 40-м годам относятся и важные исследования по электрохимии, проведенные Ленцем совместно с его учеником А. С. Савельевым. В процессе этих работ было детально исследовано явление так называемой

электролитической (или гальванической) поляризации — возникновения на границе металл-электролит, при прохождении тока в гальванической цепи, дополнительной э. д. с., снижающей эффективность гальванического элемента.

В эти же годы Ленц по существу установил эквивалентность тепловой и химической энергий, доказав, что при наиболее выгодном устройстве гальванической цепи количество выделяющейся в ней теплоты измеряется расходом химической энергии в гальванической батарее. Это еще и еще раз иллюстрировало всеобщность закона сохранения и превращения энергии.

Огромное значение имели начатые Ленцем в 1838 году исследования в области теоретической и практической электротехники, где он работал в тесном творческом содружестве с выдающимся русским электротехником Б. С. Якоби (1801—1874).

1838 году Ленц в статье «О некоторых опытах из области гальванизма» впервые в истории науки сформулировал принцип обратимости электромагнитного генератора (источника) тока, указав на возможность использовать электромагнитный генератор и в качестве источника механической энергии, т. е. как электродвигатель (электромотор). Тогда же Ленц осуществил свою идею на опыте. Это открытие явилось мощным стимулом к развитию электротехники.

Изучая работу электродвигателя, Ленц в 1847 году обнаружил так называемую «реакцию якоря» и указал, как надо изменить конструкцию машины, чтобы учесть действие этого эффекта. Совместно с Б. С. Якоби Ленц провел глубокие физические исследования, заложившие основу современной теоретической электротехники.

Большое место в жизни Ленца занимала педагогическая деятельность. С 1836 года он преподавал физику в Петербургском университете, с 1840 года был деканом физико-математического факультета, а с 1863 года — ректором университета. Кроме того, Ленц читал курс физики в ряде других учебных заведений Петербурга.

В 1864 году из-за болезни глаз он вынужден был отказаться от поста ректора и уехал лечиться в Италию. Ленц мечтал как можно скорее вернуться к работе, но 10 февраля 1865 года он внезапно скончался от кровоизлияния в мозг. Могила Ленца находится в Риме.

ТРУДЫ Э. Х. ЛЕНЦА

Ленц Э. Х. Избранные труды. Ред. и примеч. чл.-корр. Акад. наук СССР Т. П. Кравца. Статьи проф. К. К. Баумгарта, акад. Л. С. Берга, чл.-корр. Акад. наук СССР Т. П. Кравца, Л., 1950. 521 стр., илл.; 2 л. портр. и карт. (Акад. наук СССР. Классики науки).

Содержание: Физические наблюдения, произведенные во время кругосветного путешествия под командованием капитана Отто фон Коцебу в 1823, 1824, 1825 и 1826 годах.— Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией. — О влиянии скорости вращения на индукционный ток, производимый магнитно-электрическими машинами. — О законах электромагнитов (совместно с Б. С. Якоби).— О притяжении электромагнитов (совместно с Б. С. Якоби).— О законах выделения тепла гальваническим током.

Переводы М. М. Айхингер, Т. Н. Кладо, М. В. Савостьяновой.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Э. Х. ЛЕНЦА

Ленц Эмилий Христианович (1804—1865). — БСЭ, 2 изд., т. 24, 1953, стр. 570—571, портр.

Ржонсницкий Б. Н. Эмилий Христианович Ленц. — «Физика в школе», 1955, № 1, стр. 10—18, портр.

Баумгарт К. К. Эмилий Христианович Ленц. (Краткий биографический очерк). — В кн.: Ленц Э. Х. Избранные труды. Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 449—455, портр.

Капцов Н. А. Эмилий Христианович Ленц. — В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 105—110.

Цверава Г. К. Эмилий Христианович Ленц. — «Электричество», 1954, № 2, стр. 68—72, портр.

Ленц — один из крупнейших электрофизиков своего времени. Плодотворное влияние физических идей Ленца на работы зарубежных ученых. Ленц — автор популярного «Руководства физики», долгое время служившего единственным пособием для средних учебных заведений. Связь научных работ Ленца с потребностями практики. В конце статьи: основные даты жизни и деятельности Э. Х. Ленца.

Шателен М. А. Эмилий Христианович Ленц. 1804—1865. — В кн.: Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955, стр. 68—81.

Работы Э. Х. Ленца в разных областях науки всегда носили оригинальный характер и касались важнейших вопросов. Автор останавливается на некоторых из этих работ: «О законах электромагнитов», «О притяжении электромагнитов», «О законах выделения тепла гальваническим током» и на работах, проведенных Ленцем совместно с Б. С. Якоби. Отмечается тщательность, которая была всегда характерна для работ Ленца.

Гогоберидзе Д. Б. Замечательный русский физик Э. Х. Ленц.— «Вестник Ленингр. ун-та», 1950, № 2, стр. 3—29.

В статье характеризуется педагогическая деятельность Ленца, говорится о значении его научных работ, о достоинствах написанных им учебников, о физиках, вышедших из школы Ленца.

Лежнева О. А. Научная деятельность Э. Х. Ленца в области физики. — «Труды Ин-та истории естествознания» [Акад. наук СССР], 1952, т. 4, стр. 104—139.

В первой части статьи приводятся важнейшие факты из биографии Ленца, во второй — обзор его научных трудов.

Лежнева О. А. и **Ржонсницкий Б. Н.** Эмилий Христианович Ленц. М.—Л., Госэнергоиздат, 1952. 190 стр.; 1 л. портр. (Деятели энергетической техники. Биогр. серия. Вып. 15).

Наиболее полная биография Э. Х. Ленца, написанная на основе архивных и печатных материалов. Центральное место занимает анализ его работ в области электричества и магнетизма, а также физической географии и геофизики. Широко освещена педагогическая деятельность Ленца, его роль в создании Петербургской школы физиков.

Работы Ленца в области электромагнетизма освещены в статьях:

Гусев С. А. Открытие обратимости электрических машин. — «Электричество», 1954, № 12, стр. 70—71.

История опытов Э. Х. Ленца (1833—1838), приведших к открытию обратимости генераторов и электродвигателей.

Кравец Т. П. О работах Э. Х. Ленца в области электромагнетизма. — В кн.: Ленц Э. Х. Избранные труды. Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 465—474.

В статье определяется роль Ленца в распространении закона сохранения энергии на область явлений электромагнитной индукции и в разработке теоретических основ электромагнетизма, говорится о его заслугах в установлении принципа обратимости динамомашин и электромоторов, в открытии реакции якоря и изыскании способов борьбы с ней, в изобретении индукционных измерительных приборов.

Баумгарт К. К. Работы Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби по электромагнетизму.— В кн.: Вопросы истории отечественной науки. Общее собрание Академии наук СССР, посвященное истории отечественной науки 5—11 января 1949 г. М.—Л., Акад. наук СССР, 1949, стр. 174—186.

Значительный интерес представляют также статьи:

Савельев А. С. О трудах академика Ленца в магнито-электричестве. — «Журн. м-ва нар. просв.», 1854, авг., отд. 5, стр. 1—22; сент., стр. 23—48.

Автор статьи — один из наиболее талантливых учеников и сотрудников Ленца (1820—1860).

Лебединский В. К. Э. Х. Ленц как один из основателей науки об электромагнетизме. — «Электричество», 1895, № 11—12, стр. 153—161.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 470—473.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 355, 368.

История естествознания в России. Т. 1, ч. 2, стр. 134—141, 143—144, 146—147, 149—153.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 206—207, 220—221, 251—252 и др. (см. именной указатель).

БИБЛИОГРАФИЯ ТРУДОВ Э. Х. ЛЕНЦА

Лукомская А. М. Библиографический указатель печатных трудов Э. Х. Ленца и материалов о его жизни и деятельности.—В кн.: Ленц Э. Х. Избранные труды. Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 480—515.

Указатель состоит из трех разделов: 1. Труды Э. Х. Ленца, опубликованные в печати (с 1824 по 1863 гг.). 2. Краткие сведения о научной деятельности Э. Х. Ленца (с 1829 по 1864 гг.). 3) Основная литература о жизни и деятельности Э. Х. Ленца (с 1833 по 1950 гг.).

РОБЕРТ ЮЛИУС МАЙЕР

(1814—1878)

Имя Роберта Майера стоит первым в славном ряду исследователей, которым принадлежит бессмертная заслуга окончательного установления одного из наиболее общих законов природы — закона сохранения и превращения энергии.

Идеи, приведшие к установлению этого закона, вырабатывались в человеческом сознании на протяжении жизни не одного поколения. Своими корнями эти идеи уходят в древнегреческую философию природы, а в новое время связаны с именами Декарта, Гюйгенса, Лейбница, Ломоносова и др. Первые формулировки закона сохранения и превращения энергии (или «сил», как тогда говорили) были даны в работах Сади Карно (1832 г.)[1] и Фарадея (1840 г.).

Многие исследователи пытались подтвердить этот закон экспериментально путем определения механического эквивалента теплоты.

Окончательное его установление, наиболее полная его формулировка как универсального закона природы, экспериментальное подтверждение и математическая обработка связаны в основном с именами трех ученых — Майера, Джоуля и Гельмгольца.

Роберт Майер родился 25 ноября 1814 года в маленьком немецком городе Хейльбронне в семье аптекаря. Здесь, в среде ограниченных бюргеров, прошла почти вся, за исключением нескольких лет молодости, трагически сложившаяся жизнь гениального ученого. Майер по профессии был врачом. В течение пяти лет (с 1832 г.) он изучал медицину в Тюбингенском университете, но в 1837 году был исключен и даже подвергся краткосрочному тюремному заключению за участие в запрещенных студенческих собраниях. В 1838 году Майер защитил диссертацию и получил степень доктора медицины. Стремясь расширить свой кругозор, он в 1840 году принял участие в плавании на остров Яву в качестве судового врача

[1] Эти работы Карно стали известны лишь в 1878 г.



Роберт Юлиус Майер

на голландском судне «Ява». Это путешествие оказалось поворотным пунктом в судьбе Майера: в молодом провинциальном враче раскрылся гениальный физик.

4 июля 1840 года Майер прибыл в порт Сурабая (остров Ява), который находится в 8 градусах от экватора. Здесь он обратил внимание на одно интересное явление: цвет венозной крови у матросов был значительно светлее, чем в северных широтах. Для местных врачей такое явление не было новостью, но никто не задумывался над его причинами.

Майер впервые сделал попытку объяснить его тем, что в жарком поясе для поддержания нормальной температуры тела должно «сгорать» (окисляться) в организме меньше пищевых продуктов, чем в холодных странах. Продолжая свои исследования, он установил, что количество сгораемых продуктов в организме при производстве им работы возрастает с увеличением работы. Тогда, по словам самого Майера, молниеносная догадка поразила его. Сопоставив два явления — увеличение количества сгорающих продуктов для увеличения тепла в теле, в одном случае, и увеличение сгорания при производстве работы — в другом, — Майер сделал гениальный вывод: так как теплота и работа могут быть получены одним и тем же путем, за счет химических реакций в организме, то теплота и механическая работа могут и превращаться друг в друга. Этот вывод, сделанный в середине июня 1840 года, явился первым шагом Майера к установлению закона сохранения и превращения энергии.

С этого времени вся научная деятельность ученого, все творческие силы его ума были посвящены обоснованию этого великого закона природы.

Возвратившись в феврале 1841 года в Хейльбронн, Майер публикует ряд работ, в которых излагает результаты своих исследований. Первая из его работ — «О количественном и качественном определении сил» (1841 г., напечатана впервые в 1881 г.) — содержала еще незрелые рассуждения о «силе». Но уже во второй—«Замечания о силах неживой природы», написанной в конце 1841 года и опубликованной в 1842 году, Майер более определенно подразумевает под «силой» то, что теперь называют энергией.

В работе 1842 года Майер впервые формулирует свою основную идею — идею взаимопревращения качественно различных, не сводимых друг к другу форм энергии (причин, как он их называет). Впервые (если не считать неизвестной тогда работы Сади Карно) Майер вычисляет на основании опытных данных механический эквивалент тепла. Из соотношения теплоемкостей атмосферного воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме Майер выводит величину механического эквивалента, равную 365 *кГм* на 1 *ккал.* теплоты (впоследствии он получил более точный результат — 425 *кГм/ккал*) [1]. В связи с этими вычислениями Майер высказал интересную мысль, что в машинах выгоднее было бы превращать химическую энергию топлива не в теплоту, а, например, в электричество и только затем уже в механическую работу. Именно такая последовательность превращений имеет место в современных тепловозах, которые

[1] Современное значение 427 *кГм/ккал.*

представляют собою один из самых эффективных в настоящее время типов железнодорожного транспорта.

Наиболее зрелой работой Майера является его большая статья «Органическое движение в его связи с обменом веществ» (1845 г.). В этой работе Майер решительно выступил против распространенного тогда мнения о возможности существования в природе неизменной «силы» (энергии), «...которая, обнаруживая действие, сама при этом не убывает» [1]. Он рассмотрел почти все известные тогда виды превращения энергии в неживой природе и дал свою окончательную формулировку закона сохранения и превращения энергии. Майер утверждал, что «сила» может существовать в качественно различных формах; такими формами «силы» являются: «сила падения» (потенциальная энергия), движения (кинетическая энергия), теплота, электричество, «сила» (энергия) химических и физиологических процессов. Все они могут превращаться друг в друга в неизменных количественных соотношениях.

Отнеся теплоту, электричество, магнетизм к «силам» (энергии), Майер тем самым выступил против теорий «невесомых жидкостей» — теплорода, электрического и магнитного флюидов и т. п. «Не существует никаких нематериальных материй»,— утверждал он [2].

Но основная цель Майера в работе 1845 года заключалась в том, чтобы рассмотреть с точки зрения закона сохранения и превращения энергии явления живой природы, в частности, физиологические явления и таким образом развенчать широко распространенную в то время идеалистическую теорию, по которой процессы в живом организме происходят благодаря особой, нематериальной «жизненной силе». Майер впервые сделал попытку объяснить работу мускулов как результат превращения в них химической энергии приносимых кровью питательных веществ. Одним из первых он высказал в этой работе мысль, что растения являются сложной химической лабораторией, где совершается переход поглощаемой ими солнечной энергии в энергию химическую. Позднее эти мысли Майера получили блестящее подтверждение в классических трудах К. А. Тимирязева.

В более поздней статье — «К вопросу о динамике неба» (1848 г.) — Майер пытался объяснить с точки зрения закона сохранения и превращения энергии источники энергии излучения Солнца (предположив, что она возникает за счет энергии падающих на Солнце метеоритов). С этой же точки зрения он рассматривал явление приливов и отливов.

Величайшее открытие Майера — установление закона сохранения и превращения энергии вначале не только не встретило признания, но имело для ученого самые трагические последствия. В научных кругах знали лишь о второй, еще далеко не совершенной работе Майера 1842 года. Работу 1845 года ему лишь с трудом удалось издать на собственные средства в Хейльбронне в виде отдельной брошюры, которая долгое время оставалась почти никому не известной. Отчасти на этом основании первооткры-

---

[1] Майер Г. Закон сохранения и превращения энергии. Четыре исследования 1841—1851. М., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 112.

[2] Там же, стр. 130.

вателем закона сохранения и превращения энергии английские ученые провозгласили Джоуля. Позже высоко оценивались работы в этом направлении Гельмгольца. О Майере попросту ничего не знали. Когда же он сделал попытку защитить свой приоритет, против него началась дикая травля со стороны местных ученых и в печатных органах Хейльбронна. Упорное нежелание их прислушаться к доводам Майера и даже прямой отказ печатать его работы, крайне тяжелая обстановка в семье, где его считали чуть ли не помешанным, — все это привело Майера к тяжелому нервному расстройству, а в 1850 году даже к попытке покончить жизнь самоубийством, после чего он навсегда остался калекой. В 1851 году Майер заболел воспалением мозга и после болезни был без всяких серьезных оснований упрятан родственниками в дом для умалишенных, где провел целый год в ужасных физических и нравственных страданиях. Когда в 1853 году Майера выпустили на свободу, он оказался совершенно забытым.

Только в конце 50-х и начале 60-х годов начались выступления ученых в защиту научных прав Майера (Либих, Тиндаль, Клаузиус). Научные заслуги Майера признал и Гельмгольц. В 1854 году в докладе о взаимодействии сил природы он сказал: «Первый правильно понял и формулировал закон, о котором идет здесь речь (закон сохранения энергии. — *С. Е.*), немецкий врач в Хейльбронне Р. Ю. Майер в 1842 г.». В 1858 году Майер был избран почетным членом Базельского общества естествоиспытателей.

Вместе с тем в том же 1858 году распространился слух, что он умер в доме для умалишенных. Сообщение об этом было помещено даже в крупнейшем биографическом словаре Поггендорфа.

В 1867 году вышло полное собрание сочинений Майера — «Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften von Robert Mayer» (последующие издания в 1874 и в 1893 гг.).

В 1862 году Майер вновь вернулся к научной деятельности. Однако последние 16 лет жизни уже ничего не прибавили к его исследованиям 40-х годов. Перенесенные потрясения остались тяжелой раной в душе ученого до самой его смерти 20 марта 1878 года.

Наиболее глубокую оценку научным заслугам Роберта Майера дал (в 70-е годы) Фр. Энгельс в «Диалектике природы», которая, однако, впервые увидела свет лишь в 1925 году. Энгельс писал: «*Количественное* постоянство движения было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь (Клаузиусом, Робертом Майером). Зато превращение *формы* движения открыто только в 1842 г., и это, а не закон количественного постоянства, есть новое»[1]. И далее: «...Майер... в 1845 г. ...сумел сообщить гораздо более гениальные вещи об «отношениях между различными процессами природы», чем Гельмгольц в 1847 г.»[2].

---

[1] Энгельс Ф. Диалектика природы. М., 1955. стр. 224—225.
[2] Там же, стр. 52.

ТРУДЫ Р. Ю. МАЙЕРА

Майер Р. Закон сохранения и превращения энергии. Четыре исследования. 1841—1851. Под ред., с вводной статьей и примеч. А. А. Максимова. М., Гостехтеоретиздат, 1933. 311 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания).

Содержание: О количественном и качественном определении сил.— Замечания о силах неживой природы.— Органическое движение в его связи с обменом веществ.— Замечания о механическом эквиваленте теплоты.

Переводы А. А. Максимова и П. С. Юшкевича.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Р. Ю. МАЙЕРА

Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955, стр. 52, 155, 224, 225.

Майер Юлиус Роберт (1814—1878). — БСЭ, 2-е изд., т. 26, 1954, стр. 75—76, портр.

Каценельсон Ю. Д. Роберт Майер. — «Физика в школе», 1938, № 2, стр. 27—31, портр.

Максимов А. А. Краткая биография и обзор работ Р. Майера. — В кн.: Майер Р. Закон сохранения и превращения энергии. М., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 283—309.

Суворов С. Г. Роберт Майер — великий основоположник закона сохранения и превращения энергии. (К 95-летию его работы «Замечания о силах неживой природы»).— «Книга и пролетарская революция», 1937, № 11, стр. 118—124.

Максимов А. А. Роберт Майер и закон сохранения и превращения энергии. — В кн.: Майер Р. Закон сохранения и превращения энергии. М., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 7—57.

Исторический очерк формирования закона сохранения и превращения энергии, получившего в работах Роберта Майера наиболее полное и наиболее глубокое выражение

* *
*

Тиндаль Д. Теплота, рассматриваемая как род движения. Публичные лекции. Пер. с 7-го англ. изд. Под ред. и с примеч. проф. А. П. Шимкова. Изд. 2-е. М., 1888, стр. 90—104, 441—469.

Лекция 18-я: Труды Майера (стр 441—469)

Несколько страниц посвящено Майеру также в лекции 5-й (стр. 90—104): Вычисление механического эквивалента теплоты Майером.

Джон Тиндаль (1820—1893) — видный английский физик, талантливый популяризатор науки — был ревностным защитником идей Роберта Майера.

Маракуев Н. Н. Роберт Майер. М., 1897. 103 стр., илл.; 1 л. портр. (Из истории физики XIX столетия. Очерки трудов ее выдающихся деятелей. Кн. 2).

Очерк жизни и деятельности. История борьбы, развернувшейся вокруг открытия Майера.

Оствальд В. Юлий Роберт Майер. — В кн.: Оствальд В. Великие люди. Пер. с 2-го нем. изд. Г. Кваша. [Спб.], 1910, стр. 58—95.

Биография Р. Ю. Майера: его юность, годы учения, диссертация, врачебная практика, путешествие на Яву, первые идеи, главный труд, творческий подъем, формулировка закона сохранения и превращения энергии, последние годы жизни.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 472—482.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 143—147, 152—154.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 12—41.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 307—311.

ДЖЕМС ПРЕСКОТТ ДЖОУЛЬ

(1818—1889)

Научная деятельность английского физика Джоуля охватывала в основном три важнейшие области физики — электромагнетизм, теорию теплоты и теорию строения материи.

В историю мировой науки он вошел прежде всего как один из основоположников кинетической теории газов. Наряду с Робертом Майером и Гельмгольцем Джоулю принадлежит также честь окончательного установления закона сохранения и превращения энергии.

Джемс Прескотт Джоуль родился 24 декабря 1818 года в г. Манчестере. Отец его был пивоваром и владельцем пивоваренного завода, на котором и сам Джоуль работал в течение почти 20 лет (до 1854 г.). В то же время Джоуль, глубоко интересовавшийся химией, физикой и математикой, брал частные уроки у знаменитого английского химика и физика Джона Дальтона (1766—1844).

Научная деятельность Джоуля началась с изобретения им в 1838 году электрического двигателя, в котором он один из первых использовал вращательное движение проводников с током в магнитном поле[1].

В процессе опытов с электрической машиной молодой физик сделал в 1840 году свое первое научное открытие — обнаружил явление магнитного насыщения, т. е. такого состояния намагничиваемого тела, при котором совсем или почти совсем прекращается дальнейший рост его намагниченности, несмотря на увеличение внешнего магнитного поля. Джоуль вычислил и величину магнитного насыщения (для мягкого железа). Это открытие оказалось чрезвычайно важным как для электротехники, так и для теоретической физики, позволяя при известных условиях определять магнитные моменты атомов ферромагнетика.

Одним из первых Джоуль обратил самое пристальное внимание на проблему точного измерения электрического тока. Он ввел в своих иссле-

---

[1] Впервые электрический двигатель с ротационным (вращательным) движением предложил известный русский электротехник, впоследствии академик Б. С. Якоби в 1834 г.

лованиях точную единицу величины тока. За единицу он предложил принять такое количество электричества, при пропускании которого через проводник можно разложить 9 *г* воды. Продолжая свои работы, Джоуль уже в декабре того же 1840 года в «Протоколах Королевского общества» сообщил об открытии им закона, согласно которому количество тепла, выделяющегося в проводнике при прохождении по нему электрического тока, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению в цепи и времени протекания тока[1]. Джоуль сформулировал этот закон на основании всего лишь трех не очень надежных измерений, сумев, однако, верно схватить основные зависимости между соответствующими физическими величинами.

Несколько позже (1844 г.) опубликовал свои результаты русский физик Э. Х. Ленц, который на основании огромного экспериментального материала проверил и подтвердил этот закон. Поэтому в науку закон теплового действия тока вошел как закон Джоуля-Ленца. Он играет огромную роль в современной физике. Закон Джоуля-Ленца лежит в основе расчета любых электрических цепей, всех электронагревательных и многих электроосветительных приборов. Для самого Джоуля это открытие сыграло колоссальную роль. Наблюдавшееся им на опыте превращение электричества в теплоту, строгая связь между колчествами того и другого — все это навело ученого на глубокие размышления, результатом которых было установление Джоулем, независимо от Майера, закона сохранения и превращения энергии. Джоулю принадлежит заслуга доказательства этого закона путем осуществления точных количественных опытов над превращением в теплоту различных видов энергии (энергии электрического тока, энергии сжатия и расширения газов и др.). Основным и классическим по простоте и точности был его опыт (1843 г.) по превращению механической энергии в теплоту: вода нагревалась за счет трения о лопасти, вращавшиеся в калориметре под действием падающего груза. Этот опыт позволил непосредственно определить механический эквивалент теплоты и до сих пор используется в физических лабораториях для наиболее наглядной демонстрации закона сохранения и превращения энергии.

Результаты своих исследований Джоуль изложил в том же 1843 году в работе «О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом значении тепла». В дальнейших работах (1847 и 1850 гг.) Джоуль усовершенствовал постановку своего опыта для определения механического эквивалента тепла. Метод Джоуля вошел во все учебники физики. Значение, полученное Джоулем для механического эквивалента тепла, в среднем было немного больше 425 *кГм* на одну большую калорию тепла (по современным данным 427 *кГм/ккал*).

О своих исследованиях Джоуль дважды (в 1843 и 1847 гг.) докладывал на физико-математической секции Британской ассоциации ученых, однако значение его работ не сразу было понято и оценено. Джоуль писал об этом: «Сообщение должно было пройти без обсуждений, если бы, одна-

---

[1] Полное изложение открытия Джоуля было опубликовано в 1841 г. в «Philosophical Magazine». Собственно упоминания о времени в формулировке закона, данной Джоулем, не было; зависимость от времени подразумевалась сама собою.



Джемс Прескотт Джоуль

ко, не поднялся с места один молодой человек и своими разумными замечаниями не возбудил живого интереса к новой теории». Это был Уильям Томсон, в будущем один из крупнейших физиков мира. С 1847 года началось тесное творческое содружество Джоуля и Томсона.

Итогом исследований, начатых ими совместно и длившихся несколько лет, было открытие явления, которое получило название эффекта Джоуля-Томсона. Сущность этого явления заключается в том, что при переходе свободно расширяющегося газа из резервуара, где он находится под высоким давлением, в резервуар с меньшим давлением, температура большинства газов и воздуха понижается, так как при быстром свободном расширении внутренняя энергия газа расходуется на преодоление сил сцепления молекул газа. Нагреться же от окружающей среды газ не успевает, так как, вследствие сравнительной быстроты процесса, расширение идет почти адиабатически (т. е. без теплового обмена с окружающей средой).

При перепаде давлений в 1 *атм* температура меняется всего на 0, 25°С, поэтому Джоулю и Томсону при современном им состоянии экспериментальной техники с трудом удалось обнаружить такие ничтожные изменения температуры. Но впоследствии, в 80-е годы, с общим развитием техники, с появлением мощных воздушных насосов, способных нагнетать газ до очень высоких давлений, на основе эффекта Джоуля-Томсона был разработан метод сжижения газов, который долгое время был единственным методом и имел чрезвычайно большое значение как научное, так и техническое.

В своих исследованиях по физике газов Джоуль рассматривал газ с молекулярно-кинетической точки зрения, т. е. как совокупность большого числа движущихся молекул.

Именно Джоуль впервые провел глубокие систематические экспериментальные и теоретические исследования газов, исходя из молекулярно-кинетических представлений об их природе и механических представлений о теплоте. На этой основе Джоуль впервые теоретически вычислил теплоемкости некоторых газов. Он первый вычислил также скорость собственных движений молекул в газах, исследовал их зависимость от температуры газа и с помощью этого теоретически обосновал закон Мариотта — Гей-Люссака. Давление на стенки сосуда Джоуль правильно объяснял как результат непрекращающихся ударов молекул, находящихся в тепловом движении.

Джоулю принадлежит первый расчет термодинамической шкалы абсолютных температур (шкалы Кельвина). Температура тела в термодинамической шкале Кельвина (У. Томсона) определяется произведенной работой и вычисляется на основе законов термодинамики, общих для всех веществ. При определении же температуры с помощью термометров, т. е. по величине теплового расширения тех или иных веществ (ртуть, спирт), для построения температурной шкалы термометра необходимо учитывать различный характер расширения веществ.

Свои исследования и выводы по молекулярно-кинетической теории газов Джоуль изложил в сочинении «Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей» (1851 г.).

Всего при жизни ученого было опубликовано 97 его научных работ. 20 из них были выполнены совместно с У. Томсоном. В 1849 году за большие научные заслуги Джоуль был удостоен медали Коплея, а еще через год избран в члены Лондонского королевского общества. Он был также почетным доктором физики Эдинбургского (с 1871 г.) и Лейденского (с 1875 г.) университетов.

Умер Джоуль 11 октября 1889 года.

ТРУДЫ Д. П. ДЖОУЛЯ

Джоуль Д. П. Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей. — В кн.: Основатели кинетической теории материи. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 31—38.

Сообщение, доложенное на собрании членов Манчестерского литературного и философского общества 3 октября 1848 года. Впервые опубликовано в 1851 году.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Д. П. ДЖОУЛЯ

Джоуль Джемс Прескотт (1818—1889).— БСЭ, 2-е изд., т. 14, 1952, стр. 238, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. 1. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1929, стр. 337—338, портр.

Радовский М. И. Джемс Прескотт Джоуль. (К 50-летию со дня смерти). — «Книга и пролетарская революция», 1939, № 11, стр. 104—106.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 488—492.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 149—155, 368.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 34—41, 49—57, 76—79, 210—212 и др. (см. именной указатель).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 254—255, 285 и др.

ЖАН БЕРНАР ЛЕОН ФУКО

(1819—1868)

Французский физик Леон Фуко родился 18 сентября 1819 года в Париже. Отец его был известным книгоиздателем. Уже в детстве Фуко проявил незаурядные способности — в 13 лет он почти без всяких инструментов мастерил сложные технические игрушки (телеграф, паровую машину и др.). В юности Фуко интересовался медициной и даже намеревался посвятить себя хирургии. Однако намерение это осталось неосуществленным: Фуко оставил медицину. Связанная же с ней работа с микроскопом привела его в совсем другую область — область экспериментальной физики, где он нашел свое настоящее призвание.

Фуко занимался механикой, электричеством и электромагнетизмом, оптикой, теплотой, всюду проявляя выдающийся талант экспериментатора. Все приборы, с которыми Фуко проводил свои опыты, были построены им самим и постепенно составили физический кабинет ученого, прославившийся далеко за пределами Франции.

Еще будучи студентом-медиком, Фуко сконструировал прибор для электрического освещения поля зрения микроскопа и уже вскоре после изобретения фотографии (в конце 30-х гг. XIX столетия) впервые стал получать отчетливые снимки объектов под микроскопом. Ему принадлежит также изобретение первого автоматического регулятора света для дуговой электрической лампы. В частности, при помощи регулятора Фуко в Парижском оперном театре имитировали восход солнца.

В 1850 году Фуко при помощи усовершенствованного им вращающегося зеркала блестяще осуществил идею Араго — измерил скорость света в воде и воздухе. Результаты этих опытов, показавшие, что свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе, надолго прекратили спор между сторонниками корпускулярной и волновой теорий света, разрешив его в пользу последней. В том же году Фуко был удостоен за эти исследования золотой медали Коплея.



Леон Фуко

В 1852 году Фуко изобрел гироскоп — прибор, представляющий собою укрепленное в кардановом подвесе твердое тело, которое, будучи приведено в быстрое вращение вокруг некоторой оси, сохраняет направление в пространстве этой оси вращения. Фуко сконструировал ряд гироскопических приборов, с помощью которых можно было наблюдать и изучать вращение твердого тела.

Свойства гироскопа широко используются в современной технике: для придания устойчивости кораблям и самолетам во время движения (гироуспокоители), для определения направления (гирокомпасы) и даже для автоматического управления движением самолетов, судов, реактивных снарядов (гирорулевые).

Назначенный в 1855 году на специально для него учрежденную должность физика в Парижской обсерватории, Фуко и тут сделал ряд коренных усовершенствований. Он впервые разработал точный метод изготовления зеркал для крупных рефлекторов и предложил (как и независимо от него немецкий ученый К. Штейнгейль) делать вместо металлических более легкие и дешевые стеклянные зеркала, покрывая их тонкой пленкой серебра [1], которую при потускнении легче сменить, чем перешлифовывать металлическое зеркало.

Фуко принадлежит также изобретение ряда других приборов и приспособлений.

Всемирную славу принес ученому его знаменитый опыт с маятником, наглядно демонстрирующий вращение Земли вокруг своей оси.

Наиболее ранние записи о видимом отклонении плоскости качаний свободно подвешенного маятника в направлении слева направо относятся ко второй половине XVII века (ученик Галилея Винченцо Вивиани; итальянский физик Джованни Полени, впервые указавший на связь этого явления с суточным движением Земли). В конце XVIII века уже высказывалась мысль о том, что плоскость качания маятника стремится сохранить свое направление в пространстве. Однако никто и никогда до Фуко не проводил точных опытов, а тем более не пытался обосновать теоретически это замечательное явление. Но даже и эти отдельные замечания, обнаруженные впоследствии в неизданных рукописях упомянутых ученых, не были известны Фуко. Полная самостоятельность его опыта не подлежит сомнению.

Первый удачный опыт Фуко, названный позже его именем, относится к 1851 году. Плоскость качаний маятника (металлический шар весом 5 *кг* на металлической нити длиной 2 *м*) за 30 мин. заметно повернулась в направлении вращения небесной сферы (т. е. слева направо). Повторив вслед за этим свой опыт в бóльших масштабах на Парижской обсерватории, Фуко в сообщении Парижской академии наук сформулировал точный закон видимого отклонения плоскости качаний маятника в зависи-

---

[1] В настоящее время рабочую поверхность стеклянных зеркал для рефлекторов покрывают тонким слоем алюминия путем испарения его в вакууме. Слой алюминия практически не тускнеет и имеет высокий коэффициент отражения.

мости от угла поворота Земли и географической широты места наблюдения.

Вскоре после опубликования исследований Фуко в Парижском Пантеоне начали демонстрировать опыт Фуко с громадным маятником: длина стальной проволоки была равна 67 *м*, ее диаметр — 1,4 *мм*, а чечевица с острием весила 28 *кг*. Одно полное колебание маятник совершал за 16 сек., пробегая при этом расстояние в 14 *м*. В семи метрах от центра плоскость маятника поворачивалась за один период (16 сек.) на 2,5 *мм*. Опыт с маятником вызвал сенсацию. Большие толпы народа стекались посмотреть на это чудо — возможность своими глазами видеть суточное вращение Земли. Со всех концов мира в Париж направлялись сотни писем с расспросами о необыкновенном маятнике.

При жизни Фуко в Париже был сооружен еще один большой маятник его имени. Он демонстрировался на Парижской выставке в 1855 году. Колебания этого маятника поддерживались специальным электромагнитным устройством, также изобретенным Фуко.

Среди многочисленных повторений опыта Фуко наиболее грандиозным явилась демонстрация его в Исаакиевском соборе в Ленинграде (1931). Это был самый большой из всех где-либо сооружавшихся маятников Фуко: длина нити равнялась 98 *м* при диаметре в 1 *мм*, чугунный шар, подвешенный на ней, весил 60 *кг*. В течение одного периода (20 сек.) на расстоянии 5 *м* от центра плоскость качаний поворачивалась на 6 *мм*.

После 1851 года Фуко демонстрировал вращение Земли и при помощи своего гироскопа.

Из других научных достижений Фуко должны быть отмечены открытые и впервые описанные им так называемые «токи Фуко» — индукционные вихревые токи, возникающие в массивных сплошных проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока и вызывающие нагревание этих проводников. Уменьшение вредных токов Фуко в трансформаторах путем замены сплошного сердечника сердечником из тонких изолированных пластин значительно повышает их эффективность. Вместе с тем во многих областях техники токи Фуко оказались весьма полезными (в металлургии, например, где они широко используются для плавки металлов, в вакуум-технике и др.).

Работы Фуко — его решающий опыт, подтвердивший справедливость волновой теории света, блестящие опыты с маятником — далеко не сразу были оценены Парижской академией наук. Попытка Фуко выставить в 1857 году свою кандидатуру в Академию окончилась неудачей, хотя он и прошел по числу голосов. Только спустя восемь лет, когда Фуко уже был членом Лондонского королевского общества и Берлинской академии наук, его избрали, наконец, в члены Парижской академии. В 1860 году Фуко был избран также в члены-корреспонденты Петербургской академии наук.

В последние годы жизни ученого ему пришлось отдавать свои силы главным образом техническим изобретениям, требовавшим громадного умственного напряжения, что подрывало его весьма слабое здоровье. Последним изобретением Фуко был знаменитый регулятор скорости, с помощью которого на Всемирной промышленной выставке в Париже в

1867 году одновременно управлялись все машины американского павильона — от маленьких ткацких станков до огромных деревообделочных машин.

Фуко мечтал заняться чисто научными проблемами, строил планы на десятки лет вперед. Но тяжелая неизлечимая болезнь приковала его к постели, и после шести месяцев мучительных страданий, 11 февраля 1868 года, на 48-м году жизни Фуко скончался.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Ж. Б. Л. ФУКО

Фуко Жан Бернар Леон (1819—1868).— БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 632.

Верин А. Опыт Фуко. Научно-популярный очерк. Л.—М., Гостехтеоретиздат, 1934. 100 стр. с илл.; 1 л. портр.

Очерк состоит из следующих глав: Земля вертится! — Материальные (физические) доказательства (вращения Земли вокруг оси). — В чем состоит опыт Фуко. — Жизнь и деятельность Фуко. — История первых опытов. — Повторения и усовершенствования опытов. — Опыт Фуко в царской России и в СССР.

Пильчиков Н. Д. О маятнике Фуко.— «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1900, № 9 (285), стр. 193—197.

Обзор опытов, произведенных с маятником Фуко за период с 1852 по 1900 г.

Зилов П. А. Маятник Фуко.— «Физическое обозрение», 1903, т. 4, № 2, стр. 76—83.

Статья написана с широким использованием работы Фуко «Экспериментальное доказательство вращения Земли» (1851 г.). Описаны, в частности, некоторые технические изменения в устройстве маятника Фуко (начала девятисотых годов), позволяющие «каждому повторить этот важный опыт».

Каменьщиков Н. Опыт Фуко в б. Исаакиевском соборе в Ленинграде.— «Мироведение», 1932, № 5, стр. 99—109.

* * *

К избранию Ж. Б. Л. Фуко членом-корреспондентом Петербургской Академии наук. — «Вестник Акад. наук СССР», 1955, № 9, стр. 79—82.

Публикация документов, хранящихся в Архиве Академии наук СССР:

1. Извлечение из отчета акад. Б. С. Якоби о заграничной командировке в 1851 году. Приводится сообщение о знакомстве с Фуко, блестящая характеристика его научных заслуг. 2. Представление Фуко в члены-корреспонденты Петербургской академии 15 ноября 1860 г., подписанное членами секции физики Б. С. Якоби, Э. Х. Ленцем, Н. Н. Зининым и др. 3. Письмо Ж. Б. Л. Фуко Б. С. Якоби 28 декабря 1860 г. с выражением благодарности за избрание в Петербургскую академию наук.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 515—517.

Лакур П. и **Аппель Б.** Историческая физика. Т. 1, стр. 288—290; т. 2, стр. 371.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 107—110, 134—135 и др. (см. именной указатель).



ГЕРМАН ЛЮДВИГ ФЕРДИНАНД ГЕЛЬМГОЛЬЦ

(1821—1894)

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц — один из крупнейших естествоиспытателей XIX века. Его научные труды охватывают важнейшие области физики, механики, физиологии, математики, а также философии. Гельмгольц, как писал о нем Д. К. Максвелл, был «...замечательнейшим примером ученого, у которого широкое знакомство с наукой соединялось с глубиной и основательностью знаний, с основательностью, требовавшей овладения многими науками и этим самым оставившей свой след в каждой из них»[1].

Гельмгольц родился 31 августа 1821 года в Потсдаме в семье учителя гимназии. Еще в школьные годы он увлекся естественными науками, особенно физикой. Семнадцати лет Гельмгольц по настоянию родителей поступил в Королевский медико-хирургический институт в Берлине. После окончания его он должен был отработать несколько лет военным хирургом в Потсдаме.

Однако ни это невольное уклонение в медицину, вопреки его основным интересам, ни загруженная работой суровая жизнь в потсдамских казармах не заглушили в Гельмгольце духа исследователя и прежде всего физика. Занятия же медициной прибавили к его биографии еще и выдающиеся исследования в области физиологии.

Физиологии были посвящены первые научные исследования Гельмгольца, начатые в 40-е годы. Но и здесь его интересуют прежде всего проблемы физического характера. Гельмгольц выступает против теории «жизненной силы», видя в ней «вечный двигатель». Этой теории он противопоставляет утверждение, что процессы в живом организме подчиняются закону сохранения энергии («силы», как тогда говорили), в справедливости которого Гельмгольц был уверен уже в эти годы. Не зная ничего о работах Р. Майера и почти ничего об опытах Джоуля, Гельмгольц

---

[1] Максвелл Д. К. Речи и статьи. М.—Л., Гостехиздат, 1940, стр. 177.

пытается доказать этот закон в опытах над сокращением мышцы от электрического заряда.

Далее Гельмгольц ставит перед собою более широкую задачу — показать применимость закона сохранения энергии ко всем известным тогда физическим явлениям. Эту задачу он блестяще решает в своей классической работе «О сохранении силы», вышедшей в 1847 году. Сам Гельмгольц рассматривал ее как работу, в которой только проясняются уже известные факты. Однако действительное ее значение было неизмеримо больше. В этой работе Гельмгольц дал математическое выражение закона сохранения энергии и впервые теоретически показал его универсальность. Работа «О сохранении силы», встреченная вначале некоторыми физиками враждебно, вскоре принесла молодому ученому широкую известность и заслуженную славу. В 1848 году Гельмгольц получает приглашение в Берлинскую академию художеств на место преподавателя анатомии, что дает ему возможность досрочно оставить утомительную работу военного хирурга. Вскоре он становится профессором анатомии и физиологии в Кенигсбергском (с 1849 г.), а затем в Боннском (с 1855 г.) и в Гейдельбергском (с 1858 г.) университетах.

В эти годы Гельмгольц делает выдающиеся открытия в области физиологии — открывает нервную клетку (нейрон) и устанавливает (1850 г.) фундаментальной важности факт, что возбуждение по нерву распространяется не мгновенно, как считали до него, а с конечной скоростью, равной нескольким десяткам метров в секунду.

В своих физиологических исследованиях Гельмгольц все чаще выступает как физик. Особенно сильно проявилось это в его работах по акустике («О комбинационных тонах»; «О механизме слуховых косточек и барабанной перепонки» и др.). В этих работах Гельмгольц создал классическую теорию слухового аппарата человека, восприятия им звука, разработал физические и физиологические основы теории музыки. Он исследовал колебание скрипичной струны и впервые решил сложнейшую задачу о звучании органной трубы, которую до него не удавалось решить таким выдающимся математикам, как Д. Бернулли, Эйлер, Лагранж и Пуассон.

Результаты своих работ в области акустики Гельмгольц объединил затем в большом труде — «Учение о восприятии звуков».

Одновременно с занятиями акустикой Гельмгольц вел исследования в области физиологической и физической оптики. Первым крупным открытием Гельмгольца в оптике было изобретение им в 1851 году глазного зеркала (офтальмоскопа), которое сделало возможным наблюдение внутреннего строения глаза у живого человека и в настоящее время применяется в медицине.

В области физиологической оптики основной заслугой Гельмгольца является разработка теории пространственного и цветового зрения (1859—1866), в основу которой было положено признание существования трех основных цветоощущающих элементов в сетчатке глаза (мысль об этом впервые высказал М. В. Ломоносов). Гельмгольц показал, что, кроме красного и зеленого, третьим основным цветом, воспринимае-



Герман Гельмгольц

мым сетчаткой глаза, является фиолетовый, а не синий, как это утверждал в свое время Юнг.

Итогом обширных и многообразных исследований Гельмгольца в области теории зрения является его большой труд «Руководство по физиологической оптике» (1867 г.).

Ему же принадлежат такие важные экспериментальные исследования по физиологической оптике, как исследование явлений аккомодации и вращения глазного яблока.

В области физической оптики Гельмгольц исследовал так называемую разрешающую способность микроскопа и один из первых разработал теорию аномальной дисперсии. Гельмгольцу принадлежит также изобретение (в 1857 г.) телестереоскопа — прообраза полевого бинокля.

Наконец третьей областью исследований, проведенных Гельмгольцем в период 50—60-х гг., были его теоретические работы по гидродинамике.

В работе «Об интегралах уравнений гидродинамики, соответствующих вихревым движениям» (1858 г.) Гельмгольц создал классическую теорию вихревого движения, получившую в XIX веке чрезвычайно широкое распространение. Выявленная им аналогия между свойствами вихревого движения жидкости и свойствами магнитного поля электрического тока оказала влияние на развитие теоретической электродинамики. Теория Гельмгольца привела к попыткам представить электродинамические явления как следствия механических вихревых движений в особой среде — мировом эфире. Уильям Томсон выдвинул гипотезу вихревого строения материи, утверждая, что атомы представляют собою лишь вихри в эфире. Другой знаменитый английский физик Дж. Томсон уже в начале XX века пытался построить вихревую модель кванта света. Однако эти попытки не были плодотворными.

Крупным исследованием Гельмгольца в области гидродинамики является его работа «О прерывном движении жидкости» (1868 г.), где рассматриваются движения со скачкообразным изменением скорости.

Работы по гидродинамике принесли Гельмгольцу славу крупнейшего физика-теоретика. Еще раньше Гельмгольца приглашали руководить кафедрой физики в Оксфорде, а затем, в 1871 году, в Кембридже и Берлине. Гельмгольц принял последнее предложение и с 1871 года возглавил в Берлинском университете кафедру физики. Кроме того, Гельмгольц руководил физическим институтом при университете со времени основания этого института в 1874 году и до 1888 года, когда он был избран президентом вновь созданного в Берлине Государственного физико-технического института. К берлинскому периоду деятельности Гельмгольца относятся его фундаментальные работы в области электродинамики, механики, термодинамики и электрохимии.

Гельмгольц был одним из крупнейших представителей механистической физики. Еще в работе «О сохранении силы» он пытался свести все явления природы, в частности электромагнитные, к действию центральных механических сил, подобных силам тяготения, но это ему не удалось. Продолжая исследования электромагнитных явлений, Гельмгольц в 1869 году создал свою теорию электродинамического потенциала — нап-

более полную теорию электродинамических явлений, основанную на представлении о дальнодействии. Она сменила собою электродинамику В. Вебера несостоятельность которой как противоречащей закону сохранения энергии теоретически доказал Гельмгольц и экспериментально — его ученик Г. Герц. Однако и теория Гельмгольца не выдержала опытной проверки и была опровергнута другим учеником Гельмгольца — русским физиком Н. Н. Шиллером. Теория дальнодействия оказалась неприменимой к электродинамическим явлениям. Убедившись в этом, Гельмгольц сразу же после появления теории электромагнитного поля Фарадея — Максвелла (1873 г.) принял основные положения этой теории, опиравшейся на представление близкодействия. Однако Гельмгольц не оставил попыток свести электромагнитные явления к явлениям механическим (согласно теории Масквелла заряды взаимодействуют через посредство механической среды — эфира). В одной из последних работ, в 1892 году, Гельмгольц показал применимость к электродинамическим явлениям одного из наиболее общих принципов механики — принципа наименьшего действия.

В середине 70-х годов Гельмгольц возвратился к своим исследованиям в области электрохимии, начатым еще в молодости, и завершил их созданием теории гальванической поляризации как следствия закона сохранения энергии. Эту теорию Гельмгольц впервые изложил в своей знаменитой речи, посвященной Фарадею (1881 г.). В этой же речи, опираясь на работы Фарадея по электролизу, он один из первых решительно выдвинул гипотезу атомного строения электричества. «Если мы допускаем существование химических атомов, — говорил Гельмгольц, — то мы принуждены заключить отсюда далее, что также и электричество как положительное, так и отрицательное разделяется на определенные элементарные количества, которые играют роль атомов электричества»[1].

Исследования химических процессов в гальваническом элементе привели Гельмгольца к разработке термодинамической теории химических процессов, т. е. к применению в химии второго начала термодинамики. В частности, с этой точки зрения Гельмгольц развил идеи Клаузиуса (1857 г.) об электролизе в гальваническом элементе. Наиболее важным результатом исследований в этой области было создание Гельмгольцем учения о свободной и связанной энергии, т. е. учения о том, что в теле не вся энергия может превращаться в любые другие ее виды (свободная энергия); часть энергии тела способна проявляться только в виде теплоты (связанная энергия). Эти понятия являются фундаментальными в современной химической термодинамике.

Последние работы Гельмгольца (вплоть до 1894 г.) были посвящены обоснованию принципа наименьшего действия как наиболее общего закона природы. Эта попытка Гельмгольца (как и многих других физиков) не увенчалась, однако, успехом.

Научные теории Гельмгольца благодаря его замечательному математическому таланту отличались большой строгостью и стройностью. Он

---

[1] Гельмгольц Г. Популярные речи. Ч. 1. Спб., 1896, стр. 124.

оставил глубокий след и в самой математике, где одним из первых развивал идеи Лобачевского и Римана.

Большое внимание Гельмгольц уделял вопросам философии. Однако философия его, как и большинства ученых XIX века, отличалась непоследовательностью. Гельмгольц придавал исключительно большое значение опыту практике, как критерию истины, боролся против теории «врожденных идей», утверждал, что понятия и представления образуются в результате воздействия внешних предметов на органы чувств человека. Вместе с тем он выдвинул «теорию иероглифов», согласно которой представления о внешнем мире являются только условными знаками, символами, иероглифами и не связаны с действительными качествами этих тел. Теорию иероглифов подверг критике В. И. Ленин в своей работе «Материализм и эмпириокритицизм».

Великие научные заслуги Гельмгольца были отмечены избранием его в члены многих научных обществ и другими почестями.

Последние годы жизни ученого были омрачены тяжелыми утратами — смертью сына (1889 г.) — талантливого физика и смертью его любимого ученика Генриха Герца (1894 г.). 12 июня 1894 года после несчастного случая во время путешествия в США у Гельмгольца произошло кровоизлияние в мозг, и 8 сентября того же года он скончался.

ТРУДЫ Г. Л. Ф. ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Гельмгольц Г. О сохранении силы. Пер., ред., биогр. очерк и примеч. акад. П. П. Лазарева. Изд. 2-е, М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934. 143 стр., портр. (Классики естествознания).

Первое издание этого труда вышло в 1922 году, также в серии «Классики естествознания» (ГИЗ).

Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике: 1. О вихревом движении. 2. О прерывном движении жидкости. Пер. под ред. проф. С. А. Чаплыгина. М., 1902. 108 стр.; 1 л. портр.

Гельмгольц Г. Популярные речи. Пер. слушательниц Высших женских курсов. Под ред. О. Д. Хвольсона и С. Я. Терешина. Ч. 1—2. Спб., К. Л. Риккер, 1896.

Ч. 1. 145 стр. с илл.

Содержание: О взаимодействии сил природы (стр. 1—32). — О сохранении силы (стр. 33—72). — О цели и об успехах естествознания (стр. 73—102). — Современное развитие взглядов Фарадея на электричество (стр. 103—145).

Ч. 2. 167 стр. (фактически 184).

Содержание: О зрении человека (стр. 1—30). — Новейшие успехи теории зрения (стр. 31—124). — Вихревые бури и грозы (стр. 125—148). — Возникновение планетной системы (стр. 149—167).

Гельмгольц Г. О цели и об успехах естествознания. — Философия и естественные науки. — В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физика. Под ред. проф. А. К. Тимирязева. Вып. 1. М.—Пг., Гос. изд., 1923, стр. 43—84.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г. Л. Ф. ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955, стр. 45, 46, 48, 58, 60—61, 71 и др. (см. именной указатель).

Ф. Энгельс, впервые отметивший диалектический характер закона сохранения и превращения энергии, подверг резкой критике механистические, метафизические взгляды Гельмгольца. Энгельс также подчеркивал, что Гельмгольц дал менее глубокую трактовку закона сохранения и превращения энергии, нежели Роберт Майер.

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии. — Сочинения. Т. 14, стр. 219—226, 244—245, 251, 277.

«Гельмгольц, крупнейшая величина в естествознании, был в философии непоследователен, как и громадное большинство естествоиспытателей», — указывал В. И. Ленин. — Он склонялся к кантианству, но и этой точки зрения не выдерживал в своей гносеологии последовательно» (стр. 220). Особенно резкой критике подверг В. И. Ленин выдвинутую Гельмгольцем идеалистическую теорию символов. В то же время В. И. Ленин подчеркивал стихийный материализм Гельмгольца и противопоставлял ему махистов, обвинявших великого ученого в известной приверженности к материализму (стр. 219—226).

Гельмгольц Г. Речь на торжественном обеде [в честь его 70-летия]. — В кн.: Герман Фон-Гельмгольц (1821—1891). Публичные лекции, читанные в Московском университете... М., Моск. ун-т, 1892, стр. XI—XXVIII.

Ответная речь Гельмгольца 2 ноября 1891 года. По определению А. Г. Столетова, речь «имеет высокий автобиографический интерес и отличается свойственными Гельмгольцу глубиной мысли и изяществом формы».

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821—1894). — БСЭ, 2-е изд., т. 10, 1952, стр. 370—372, портр.

Цейтлин З. А. Герман Гельмгольц. (К 120-летию со дня рождения).— «Наука и жизнь», 1941, № 1, стр. 57—61.

Лазарев П. П. Г. Гельмгольц. — В кн.: Гельмгольц Г. О сохранении силы. Изд. 2-е. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934, стр. 15—28.

Краткий биографический очерк.

Лазарев П. П. Гельмгольц. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1925. 113 стр.; 1 л. портр.

Очерк жизни и деятельности: Гл. 1. Детские и юношеские годы Гельмгольца. Гл. 2. Гельмгольц — преподаватель анатомии в Академии художеств и профессор анатомии и физиологии в Кенигсберге. Гл. 3. Гельмгольц — профессор анатомии и физиологии в Бонне и профессор физиологии в Гейдельберге. Гл. 4. Работы Гельмгольца в гейдельбергский период. Гл. 5. Последние годы и работы берлинского периода. Гл. 6. Роль Гельмгольца в международной и мировой науке.

Зернов В. Д. Герман Гельмгольц. М.—Л., Гос. изд. 1925. 100 стр.; 1 л. портр. (Биогр. б-ка).

Книга В. Д. Зернова построена примерно так же, как и очерк П. П. Лазарева.

Грановский В. Л. и **Старокадомская Е. Л.** Герман Гельмгольц. (Его жизнь и работа). С 15 рис. М., «Моск. рабочий», 1930. 183 стр.

1. Развитие научного естествознания в Германии в начале XIX столетия. 2. Гельмгольц — человек и ученый. 3. Ранние работы Гельмгольца. 4. Работы Гельмгольца в области акустики. 5. Физиологическая оптика. 6. Гельмгольц как геометр. 7. Закон сохранения энергии. 8. Работы Гельмгольца по гидродинамике. 9. Электромагнитные явления. 10. Гальванический ток и учение о свободной энергии. 11. Основной принцип физики — начало наименьшего действия.

Оствальд В. Герман Гельмгольц. Пер. с нем. Пг., «Сотрудничество», 1919. 62 стр. (Биогр. б-ка).

То же в кн.: Оствальд В. Великие люди. Пер. со 2-го нем. изд. Г. Кваша. [Спб.], 1910, стр. 241—293.

* *
*

Максвелл Д. К. Герман-Людвиг-Фердинанд Гельмгольц. — В кн.: Максвелл Д. К. Речи и статьи. М.—Л., Гостехиздат, 1940, стр. 176—183.

В небольшом очерке Максвелла (1877 г.) приводится только несколько дат из биографии Гельмгольца. Все внимание сосредоточено на характеристике классических работ Гельмгольца — мемуара «О сохранении энергии», «Физиологической оптики», «Восприятия звука» — и выраженных в них идей.

Столетов А. Г. Гельмгольц и современная физика. Речь, читанная в заседании Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии 16 ноября 1894 г. — В кн.: Столетов А. Г. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 553—589.

То же: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л.. Гостехиздат, 1941, стр. 307—340.

Тимирязев А. К. Гельмгольц и современная физика. Речь, произнесенная на годичном собрании Моск. физического общества имени П. Н. Лебедева 6 июня 1922 г. — «Красная новь», 1923, № 5 (15), стр. 270—281.

* *
*

К 70-летию Гельмгольца был выпущен сборник:

Герман фон-Гельмгольц. (1821—1891 гг.). Публичные лекции, читанные в Московском университете в пользу Гельмгольцевского фонда. М., Моск. ун-т, 1892. 157 стр. с илл. и портр.

Содержание: А. Г. Столетов. Биографический очерк и общая характеристика (стр. 1—12). — Р. А. Колли. Сохранение энергии (стр. 13—30). — Н. Е. Жуковский. Работы по механике (стр. 37—52). — А. Н. Маклаков. Работы по физиологической оптике (стр. 53—76). — А. Г. Столетов. Работы по акустике (стр. 77—104). — Ф. П. Шереметевский. Гельмгольц как физиолог и значение его для психологии (стр. 105—128). — А. П. Соколов. Работы по электричеству в связи с химией (стр. 129—152). — А. Г. Столетов. Заключительное слово (стр. 153—156).

Лекции А. Г. Столетова перепечатаны в кн: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1941, стр. 267—277, 278—302, 303—306.

Лекция Н. Е. Жуковского воспроизведена в кн.: Жуковский Н. Е. Собрание сочинений. Т. 7. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 132—149.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 483—488; т. 2, стр. 95—96, 178—181, 186—187 и др. (см. именной указатель).

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 41—50, 150—152, 350—364, 378, 380—382 и др. (см. именной указатель).

РУДОЛЬФ ЮЛИУС КЛАУЗИУС

(1822—1888)

Выдающийся немецкий физик-теоретик Рудольф-Юлиус Клаузиус, один из основоположников термодинамики и кинетической теории газов, родился 2 января 1822 года в небольшом германском городке Кеслин. Окончив Берлинский университет, он с 1850 года преподавал физику в Артиллерийско-инженерной школе Берлина, в 1855 году был преподавателем в Политехникуме в г. Цюрихе, а затем профессором физики в университетах Цюрихском, Вюрцбургском и Боннском.

Первые научные работы Клаузиуса (1847—1849) были посвящены оптическим свойствам земной атмосферы, привлекавшим его внимание и в дальнейшем, а также некоторым вопросам механики упругих тел.

К концу 40-х годов относится и начало исследований Клаузиуса по термодинамике. К этому времени Майером, Джоулем и Гельмгольцем был установлен закон сохранения и превращения энергии. Клаузиус в своих работах занялся одним из наиболее злободневных в то время вопросов — доказательством применимости этого закона к различным физическим явлениям и тем самым доказательством его универсальности.

Работая в этом направлении, он впервые рассмотрел и проанализировал на основе механической теории теплоты малоизвестную тогда теорию тепловых машин французского инженера Сади Карно и пришел в результате к фундаментальным открытиям в области термодинамики.

Он показал, что теория Карно не противоречит закону сохранения и превращения энергии, но что, вопреки мнению Карно о неизменно сохраняющемся количестве «теплорода» в машине, в ней в действительности происходит превращение части теплоты в механическую работу; неизменной же остается общая энергия системы — машины и источников внешней силы. Но основной заслугой Клаузиуса было то, что он сумел увидеть в работе Карно идею совершенно нового принципа, определяющего специфику тепловых явлений. Этот принцип, или второе начало термодина-

ыки[1], впервые был четко сформулирован Клаузиусом в 1850 году в его работе «О движущей силе теплоты» (и почти одновременно с ним Уильямом Томсоном). В формулировке Клаузиуса второе начало гласит: теплота не может переходить сама собою от более холодного тела к более теплому.

Переход тепла от более холодного тела к более теплому всегда сопровождается компенсирующими процессами в других телах системы — переходом тепла от более теплого тела к более холодному, переходом механической работы в теплоту.

Таким образом, второе начало, дополняя требование закона сохранения и превращения энергии, указывает на то, что эти превращения могут идти не в любом направлении.

В самом деле, если первое начало термодинамики не противоречит, например, тому, что опущенный в холодную воду горячий кусок металла еще более нагреется, а вода, отдав ему свое тепло, замерзнет (лишь бы общий запас тепла воды и металла остался постоянным), то второе начало указывает на единственный результат этого опыта — нагревание воды за счет остывания металла, что и наблюдается всегда в действительности.

Развивая свои термодинамические идеи, Клаузиус в 1865 году в работе «О различных удобных для применения формах основных уравнений механической теории теплоты» ввел новое важное понятие — понятие энтропии, особой функции, однозначно определяющей термодинамическое состояние тела в рассматриваемый момент. Энтропия показывает, в какой степени различные виды энергии в теле превращены в тепловую, которая уже не может самостоятельно перейти в другие виды энергии. Так как этот переход различных видов энергии в тепловую энергию сопровождается увеличением хаотичности движения молекул тела, то энтропию можно также определить как степень хаотичности движения молекул.

Клаузиус установил далее интересную особенность этой функции. Он обнаружил, что в замкнутой системе энтропия может либо оставаться неизменной (в обратимых процессах), либо возрастать (в необратимых, т. е. во всех реальных процессах), стремясь к своему максимальному для данной системы значению. Таким образом, Клаузиус показал, что изменение энтропии также определяет направление процессов в природе и может, следовательно, служить одним из выражений второго начала. Дальнейшее исследование энтропии привело к совершенно новому, статистическому истолкованию второго начала термодинамики в работах Людвига Больцмана.

Максимальное значение энтропии замкнутой системы соответствует такому состоянию последней, когда в ней имеют место лишь хаотические тепловые движения молекул.

В реальных процессах при любых превращениях энергии часть ее необратимо переходит в теплоту (за счет трения, теплопроводности и т. д.).

На этом основании Клаузиус, ошибочно распространив свойства замкнутой системы на всю Вселенную, сделал вывод о неизбежности так на-

---

[1] Первым началом называют закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым явлениям.



Рудольф Юлиус Клаузиус

зываемой тепловой смерти Вселенной, когда все виды энергии перейдут в тепловую и все процессы, кроме хаотического движения молекул, прекратятся. Несостоятельность этой теории показал выдающийся физик-материалист Больцман.

Исследования Клаузиуса по термодинамике, или механической теории теплоты, как ее тогда называли, неотделимы от его исследований по кинетической теории газов. В этой области Клаузиус имел немало предшественников, начиная с Д. Бернулли и М. В. Ломоносова и кончая Д. Джоулем. Тем не менее, наряду со своими современниками—Кренигом и Максвеллом — Клаузиус является одним из основоположников этой теории. Уже в начале своих исследований в этой области, в статье «О роде движения, который мы называем теплотой» (1857 г.), Клаузиус указал, что в реальных газах, кроме прямолинейного, поступательного движения, должно существовать еще и вращательное движение молекул и колебательное движение атомов в молекуле, а также некоторой материи внутри самих атомов. Этим он правильно, хотя и неисчерпывающе объяснил отличие реальных газов от идеальных.

Клаузиусу принадлежит вывод и уточнение важных в теории газов формул — для вычисления средней скорости молекул газа, теплопроводности и др. Он ввел чрезвычайно важное понятие длины свободного пробега молекулы и впервые (1860 г.) вычислил эту длину. Знание этой величины позволило в дальнейшем определить размеры молекул.

Важнейшая заслуга Клаузиуса в области теории газов заключается в том, что он первый применил здесь совершенно новый метод — «метод средних величин», рассматривая те или иные физические величины, характеризующие газ как «средний» результат хаотического движения и механических взаимодействий многочисленных молекул газа. Таким образом он впервые теоретически вычислил давление газа на стенки сосуда (как некоторый средний результат непрекращающихся ударов молекул о стенки сосуда). Дальнейшее развитие этого метода, связанного с применением в физике математической теории вероятностей (Максвелл, Больцман, Гиббс, Н. Н. Пирогов, Смолуховский и др.) привело к созданию новой, весьма важной области физики — статистической физики.

Работы Клаузиуса по термодинамике и по кинетической теории газов были объединены им в большом труде «Механическая теория теплоты» (Брауншвейг, 1864—1867 гг., 2 тома).

Исследования Клаузиуса по термодинамике и теории газов лежат в основе кинетической теории материи. Опираясь на кинетические представления, он впервые построил теорию перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое, обосновал уравнение, связывающее точку плавления (отвердевания) вещества с величиной давления (уравнение Клапейрона—Клаузиуса), впервые указал на возможность испарения с поверхности твердых тел (сублимация).

Клаузиусу принадлежат также важнейшие работы по теоретической механике и электричеству.

В 1853 году он опубликовал термодинамическую теорию термоэлектрических явлений. Рассматривая термоэлемент, как тепловую машину,

он одним из первых применил к этой области явлений второе начало термодинамики.

Чрезвычайно важны работы Клаузиуса по теории электролиза. До него (если не считать быстро забытых работ Гроттуса в начале XIX в.) все теории электролиза опирались на предположение, что распадение молекул на ионы в растворе электролита происходит под действием электрической силы, которая преодолевает химическое сродство молекул. В 1857 году Клаузиус высказал правильную мысль, что в любом растворе электролита и без пропускания через него тока происходит самопроизвольная диссоциация молекул на ионы, а также обратная рекомбинация ионов в молекулы, так что в конце концов в растворе устанавливается подвижное равновесие между этими двумя процессами. Вместе с тем Клаузиус пытался выяснить и роль электродвижущей силы в явлении электролиза. Идеи Клаузиуса в этой области развил далее Гельмгольц. Работы Клаузиуса и Гельмгольца по теории электролиза подготовили создание теории электролитической диссоциации (шведский ученый Аррениус).

Одним из последних исследований Клаузиуса была разработка теории поляризации диэлектриков, на основе которой он (независимо от Моссоти) вывел формулу связи между диэлектрической проницаемостью и плотностью вещества диэлектрика (формула Клаузиуса — Моссоти).

Клаузиусу принадлежат также важные исследования в области электродинамики.

Умер Клаузиус 24 августа 1888 года в Бонне.

ТРУДЫ Р. Ю. КЛАУЗИУСА

Клаузиус Р. Механическая теория тепла. (Математическое введение. Главы. I—IV.). — В кн.: Второе начало термодинамики. Сади Карно. — В. Томсон-Кельвин. — Р. Клаузиус. — Л. Больцман. — М. Смолуховский. Под ред. и с предисл. А. К. Тимирязева. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934, стр. 71—158.

Клаузиус Р. Кинетическая теория газов. — В кн.: Основатели кинетической теории материи. Сборник статей. Под ред. А. К. Тимирязева. Пер. В. С. Гохмана. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. техн.-теорет. лит., 1937, стр. 39—164.

Клаузиус Р. О размерах и взаимных расстояниях молекул. — В кн: Основатели кинетической теории материи. М.—Л., 1937, стр. 165—170.

Клаузиус Р. Проверка возражений, выдвинутых Гирном против кинетической теории газов. — В кн.: Основатели кинетической теории материи. М.—Л., 1937, стр. 171—184.

Клаузиус Р. Связь между великими деятелями природы. Речь при вступлении в должность ректора Боннского университета 18 октября 1884 г. Пер. с нем. И. Н. Красовского. Киев, 1885. 15 стр.

Клаузиус Р. О запасах энергии в природе и пользовании ими для нашего блага. Пер. К. Флуг. Спб., Л. Ф. Пантелеев, 1887. 29 стр.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Р.-Ю. КЛАУЗИУСА

Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1955, стр. 228—230.

Критика идеалистической концепции Р. Клаузиуса в трактовке второго начала термодинамики.

См. также стр. 1, 68, 72—73, 79—80, 82, 171, 194, 219, 224, 225.

Клаузиус Рудольф (1822—1888). — БСЭ, 2-е изд., т. 21, 1953, стр. 393—394, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. 1. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1929, стр. 126—127.

Франкфурт У. И. Из истории второго начала термодинамики. «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 564—602.

II. Клаузиус, стр. 582—602.

* * *

Кудрявцев Ф. История физики. Т. 1, стр. 493—495.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 155—157, 160—161, 328.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 12, 79—89, 153—154, 187, 206—214, 312—314, 258—260, 294, 382—384.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 181—182, 185.

ГУСТАВ РОБЕРТ КИРХГОФ

(1824—1887)

Густав Роберт Кирхгоф родился 12 марта 1824 года в Кенигсберге. В Кенигсбергском университете он получил математическое и физическое образование. В дальнейшем он поочередно занимал кафедры физики в университетах Бреслау (Вроцлав) (1850 г.), Гейдельберга (1854 г.) и Берлина (с 1875 г.), где возглавил созданную специально для него кафедру математической физики. С появлением в Берлине Кирхгофа и незадолго перед тем (в 1871 г.) Гельмгольца Берлинский университет стал крупным центром теоретической физики, куда стекались молодые ученые из различных стран. А. Г. Столетов, бывший одно время студентом этого университета, писал: «Простота обращения и неутомимая внимательность в отношении к учащимся, постоянная деятельность и самообладание мысли, дар сжатой, но отчетливой речи — вот что поражало нас в Кирхгофе... Видишь, что эта глубина и точность мысли далась не вдруг и не даром, она — плод упорной роботы над собой» [1].

Научные исследования Кирхгофа охватывают три большие области физики: электродинамику, термодинамику (главным образом проблему температурного излучения тел), а также механику упругих тел.

Еще в студенческие годы Кирхгоф занялся одним из наиболее сложных вопросов теории электрического тока — вопросом о законах распределения токов в разветвленных цепях. К 1847 году он блестяще решил эту задачу, установив правила, названные впоследствии его именем. В первом из этих правил утверждается, что в местах соединения нескольких проводников (в так называемых узлах цепи) количество электричества, приносимого к узлу, равно количеству электричества, уносимому от него. Это правило, очевидно, есть одно из выражений закона сохранения количества электричества. Второе правило Кирхгофа обобщает закон Ома: во

---

[1] Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1941, стр. 34—35.

всяком замкнутом контуре, составленном из проводников цепи, алгебраическая сумма э. д. с. (т. е. сумма, полученная с учетом направления э. д. с.) равна алгебраической же сумме произведений сил токов в каждом линейном участке цепи на электрическое сопротивление этого участка. В настоящее время правила Кирхгофа лежат в основе расчетов разветвленных цепей тока.

В области электродинамики Кирхгофом были получены, кроме того, ценные результаты при исследовании разряда конденсатора, а также распространения электрических возмущений по проводам (в том числе по подводным кабелям). Он занимлся также исследованиями в области электромагнетизма, где ему принадлежит важная работа по индукции токов (1849 г.) и два больших сочинения по наведенному (индуцированному) магнетизму (1853 и 1876 гг.).

Заинтересовавшись под влиянием работ У. Томсона термодинамикой, Кирхгоф в 1859 году впервые исследовал с термодинамической точки зрения температурное излучение тел. Он рассмотрел так называемое равновесное температурное излучение тел, т. е. такое излучение, при котором температура тела не меняется со временем. Опираясь на второе начало термодинамики, Кирхгоф открыл замечательную связь между испускательной и поглощательной способностями любого излучающего тела, т. е. между количеством энергии, испускаемым квадратным сантиметром поверхности тела в 1 секунду, и отношением поглощенной телом энергии ко всей энергии, упавшей на тело.

В октябре 1859 года на заседании Берлинской академии наук Кирхгоф сформулировал открытый им основной закон равновесного температурного излучения, согласно которому отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы излучающих тел и является единой для всех тел функцией только частоты излучения (длины волны) и температуры тела.

Кирхгоф вскрыл физический смысл этой функции и показал, что она является функцией распределения энергии в спектре абсолютно черного тела [1].

Установление закона Кирхгофа открывало принципиальную возможность определять относительную температуру излучающих нагретых тел на любом расстоянии—по спектрам,—что имеет большое как научное, так и техническое значение (пирометрия). Однако для реализации этой возможности необходимо было найти конкретное выражение универсальной функции распределения энергии в спектре абсолютно черного тела. Поэтому открытие Кирхгофа стало мощным стимулом к исследованию излучения такого тела (Больцман, В. Вин, Рубенс, Курльбаум и др.). Огромным достижением было построение в 1895 году (немецкими физиками В. Вином и О. Луммером) технической модели абсолютно черного тела. Это позволило приступить к непосредственному изучению кривой

[1] Абсолютно черным телом называют такое идеальное тело, которое поглощает все падающие на него лучи; будучи нагретым, оно излучает энергию также во всех длинах волн и при этом больше, чем любое другое тело тех же размеров и при тех же условиях (понятие введено Кирхгофом).



Густав Роберт Кирхгоф

распределения энергии в его спектре. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении привели к новым и чрезвычайно важным открытиям — они выявили неполноту существовавших представлений о самой энергии излучения и привели к открытию прерывности энергии и к созданию новой, обширной области физики — квантовой физики (Планк — 1900 г.; Эйнштейн — 1905 г.).

Следствия открытого Кирхгофом закона равновесного излучения оказались не менее важными и в другой области. Уже в год установления этого закона (1859) Кирхгоф вместе с немецким химиком Р. В. Бунзеном (1811—1899) открыли новое явление. В спектре исследуемого источника, свет от которого предварительно проходил через более холодные пары натрия, на месте, где должна была быть желтая линия натрия, появилась темная линия, произошло как бы «обращение» линии натрия [1]. Исследуя это же явление не только в опытах с парами натрия, но и со многими другими веществами, Кирхгоф правильно объяснил явление обращения спектральных линий как следствие открытого им закона излучения. Действительно, из закона Кирхгофа следует, что тело, излучающее больше энергии в данном интервале длин волн, будет поглощать энергию излучения других тел преимущественно в этом же интервале. Таким образом, наряду со спектрами «испускания» должны существовать и спектры «поглощения». Они возникают в условиях, когда свет от горячего источника проходит через менее нагретое вещество, которое при этом поглощает свет как раз таких химических элементов, из каких само состоит. Это позволяло с величайшей точностью проанализировать химический состав тела, находящегося на любом расстоянии от наблюдателя, лишь бы свет от этого тела дошел до спектроскопа.

Сделав это замечательное открытие, Кирхгоф и Бунзен в 1854—1862 гг. разработали новый, чрезвычайно ценный по мощи и точности метод научного исследования — метод спектрального анализа.

Первые же результаты применения спектрального анализа позволили Кирхгофу (1861 г.) впервые правильно объяснить загадочные темные линии в спектре Солнца, открытые в 1814 году немецким физиком-оптиком И. Фраунгофером [2] (фраунгоферовы линии). Кирхгоф указал, что Солнце состоит из раскаленного жидкого ядра, окруженного атмосферой более холодных паров различных элементов, которые, поглощая в определенных частях спектра излучение, идущее из более глубоких слоев Солнца, вызывают появление фраунгоферовых линий. Сравнивая спектр Солнца с лабораторными спектрами различных химических элементов, Кирхгоф в 1861 году впервые высказал правильное предположение о химическом составе солнечной атмосферы.

Открытие спектрального анализа принесло Кирхгофу всемирную славу. На основе этого метода выросла новая обширная область физики —

---

[1] Впервые явление обращения спектра (паров натрия) наблюдал в 1849 г. французский физик Фуко, но не мог объяснить этого явления. Кирхгоф и Бунзен обнаружили это явление независимо от Фуко.

[2] Наличие темных линий в системе Солнца отметил впервые английский физик В. Волластон (1802 г.). Фраунгофер открыл их независимо и первый детально исследовал.

астрофизика, или физика небесных тел, природа которых считалась прежде вообще недоступной для исследования. Спектральный анализ стал одним из самых мощных методов исследования не только в физике, но и в химии, а также в биологии и почти во всех областях техники.

С его помощью уже сам Кирхгоф вместе с Бунзеном открыли два новых химических элемента — цезий в 1860 году и рубидий в 1861 году.

В том же 1861 году в Берлине вышло знаменитое исследование Кирхгофа „Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elementen" («Исследования солнечного спектра и спектров химических элементов»).

В области механики Кирхгоф занимался главным образом вопросами деформации, равновесия и движения упругих тел. Ему принадлежат, в частности, две классические работы, в которых в полной мере проявилась сила математических методов в физике. Впервые в этих работах им была дана общая теория равновесия и колебаний тонкой упругой мембраны (1850 г.), а также полная теория равновесия и движения под действием нагрузки тонкого призматического стержня или проволоки (1859 г.). Эти теоретические исследования Кирхгофа впоследствии получили блестящее подтверждение. В этот же период Кирхгоф занимался исследованием течения жидкости.

Работы Кирхгофа печатались главным образом в «Физических анналах», издававшихся известным немецким физиком И.-Х. Поггендорфом („Poggendorfs Annalen der Physik"), а также в других немецких научных журналах. В 1876 году и в последующие годы вышли лекции Кирхгофа по математической физике („Vorlesungen über mathematische Physik und Mechanik", 4 Bd). В 1882 году вышло собрание сочинений Кирхгофа („Gesammelte Abhandlungen"), в которое вошло большинство исследований ученого.

Научные заслуги Кирхгофа были отмечены избранием его в 1861 году в члены-корреспонденты, а в 1874 году — в действительные члены Берлинской академии наук. С 1862 года он был также членом-корреспондентом Петербургской академии наук.

Умер Кирхгоф 17 октября 1887 года в Берлине.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г.-Р. КИРХГОФА

Кирхгоф, Густав-Роберт (1824—1887). — БСЭ, 2-е изд., т. 21, 1953, стр. 137—138, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. 1. Л., Науч.-хим.-техн. изд., 1929, стр. 356—359, портр.

Столетов А. Г. Г. Р. Кирхгоф. — В кн.: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1941, стр. 31—52.

Обзор важнейших трудов и открытий Г.-Р. Кирхгофа в области электричества, механической теории теплоты, теории спектра и спектрального анализа.

Статья первоначально была напечатана в журнале «Природа» за 1873 год (кн. 2, стр. 174—199). Написанная в значительной мере по личным воспоминаниям с присущим А. Г. Столетову мастерством популяризации, статья сохранила свое научное значение и до наших дней являясь лучшим в нашей литературе очерком, посвященным Г.-Р. Кирхгофу.

Большой интерес представляет речь Людвига Больцмана:

Больцман Л. Густав Роберт Кирхгоф. М., Н. Н. Маракуев, 1897. 34 стр.; 1 л. портр. (Из истории физики XIX столетия. Очерки трудов ее выдающихся деятелей. Кн. 3).

«Тогдашние теоретические и практические курсы Кирхгофа,— говорит Больцман,— привлекали к нему учеников из всех государств, для них он был не только глубокоуважаемым учителем, импонирующим руководителем, но и теплым другом. Его чтение лекций было спокойное, ясное и тщательно обдуманное, ни слова лишнего, ни одной недомолвки — вот почему он в короткое время давал большой и богатый по содержанию материал».

Степанов Н. Кирхгоф и спектральный анализ. (По поводу десятилетия со дня кончины Кирхгофа). — «Русская мысль», 1897, окт., стр. 83—97.

Очерк жизни и творчества Г.-Р. Кирхгофа.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 521—522; т. 2, стр. 58, 71, 78 и др. (см. именной указатель).

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 1, стр. 447—458.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 157—160, 324—329 и др. (см. именной указатель).

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского, М., Гостехиздат, 1957, стр. 304—308.

Гл. VIII. Теория упругости во второй трети XIX в. 56. Густав Роберт Кирхгоф.

Характеристика работ Кирхгофа в области теории упругости.

УИЛЬЯМ ТОМСОН (КЕЛЬВИН)

(1824—1907)

Уильям Томсон был одним из крупнейших ученых Англии. Труды его охватывают почти все области физики, механики и связанные с ними области математики, астрономию, геологию, физическую географию, а также многие отрасли техники. Однако главной научной заслугой Томсона являются его труды по электричеству, теории теплоты и механике.

Уильям Томсон родился 26 июня 1824 года в Бельфасте (Ирландия). Отец его — профессор математики в университете в Глазго, — заметив незаурядные способности сына, сделал все для того, чтобы он получил блестящее математическое образование. Десятилетним мальчиком Томсон был принят в университет в Глазго, где на последнем курсе уже изучались такие сложные работы, как теория теплопроводности Фурье, которая оказала большое влияние на направление научной деятельности Томсона. После окончания в 1840 году университета Томсон продолжил образование в университете Кембриджа (1840—1845 гг.), славившемся высоким уровнем преподавания математических дисциплин. С 1845 года он около года работал в Париже у известного физика Реньо, изучавшего тепловые свойства тел. Здесь Томсон впервые непосредственно познакомился с экспериментальной физикой, в которой впоследствии приобрел не меньшую славу, чем в области теории.

Возвратившись в Англию, 22-летний ученый был избран профессором теоретической физики в университете Глазго и занимал эту должность более полувека.

Еще будучи студентом Кембриджского университета, Томсон в 1843—1845 гг. начал свои теоретические исследования электрического тока. Одним из первых он применил математический метод, разработанный в теории теплопроводности Фурье (ряды Фурье), к исследованию электрических явлений. На этой основе он в 50-е годы развил теорию распространения электрического сигнала по длинному кабелю. Томсон объяснил обнаруженное при испытании длинных проводов запаздывание электриче-

ского сигнала и нашел способ уменьшить этот эффект. Теория распространения электрического сигнала по кабелю — одна из наибольших заслуг Томсона в области электричества.

Второй, не менее важной заслугой Томсона в этой области является теоретическое обоснование колебательного разряда лейденской банки (1853 г.). Томсон впервые вывел формулу для определения периода колебаний в электрическом колебательном контуре, которая широко применяется в современной электротехнике. Этим исследованиям Томсон посвятил серию статей «Математическая теория электричества и магнетизма» (1845—1850 гг.), а также работу «Электромагнитные колебания и волны» (1853 г.), которая в дальнейшем сыграла большую роль в развитии беспроволочного телеграфа.

Наряду с теоретическими исследованиями Томсон одним из первых занялся разработкой методов точных электрических измерений. Он детально исследовал явление сопротивления проводников и изобрел прибор для очень точных измерений этой величины — так называемый «двойной мост Уитстона»[1] (описан в большой работе Томсона «Электродинамические свойства металлов», 1856 г.). Томсону принадлежит также изобретение первых вольтметров и амперметров.

В ходе измерений важной физической величины — отношения электромагнитной и электростатической единиц электрического заряда — Томсон изобрел очень точные приборы для измерения электрического потенциала — абсолютный и квадратный электрометры. В связи с работами по прокладке трансатлантического кабеля, в которых Томсон принимал самое деятельное участие, он изобрел первый чувствительный приемник электрических сигналов, передаваемых по кабелю.

Участвуя в плавании «кабельных» судов, Томсон изобрел и усовершенствовал ряд морских приборов — глубинный лот, корабельный компас и др. Всего ему принадлежит 70 патентов на изобретение различных приборов.

Исследуя электродинамические свойства металлов, Томсон в работе 1856 года описал открытое им явление переноса электрическим током теплоты в неравномерно нагретом проводнике, за счет чего температура последнего выравнивается (явление Томсона). В эти же годы он теоретически обосновал явление Пельтье[2], которое состоит в том, что в электрической цепи на стыках разнородных проводников происходит, в зависимости от направления тока, выделение или поглощение тепла.

Второй важной областью деятельности У. Томсона была термодинамика, одним из основателей которой он является, наряду с Сади Карно, Клаузиусом и др.

Исследования тепловых явлений Томсон начал во второй половине 40-х годов. Первым большим открытием его в этой области было установление абсолютной шкалы температур (1848 г.).

---

[1] По имени изобретателя простейшего прибора такого типа английского физика Ч. Уитстона (1802—1875).

[2] Открыто в 1834 г. французским физиком и метеорологом Ж. Ш. А. Пельтье (1785—1845).



Уильям Томсон (Кельвин)

При отсчете температур по шкалам обычных термометров изменение температуры определяется по расширению того или иного вещества (ртути, спирта). Сама температурная шкала при этом зависит от коэффициента расширения этого вещества. Градус абсолютной температуры, введенной Томсоном, определяется количеством работы, которое необходимо затратить, чтобы получить некоторое определенное, условно выбранное количество тепла. Согласно теории Карно это количество работы не зависит от природы вещества. Таким образом, и шкала абсолютных температур едина для всех веществ.

С точки зрения механической теории теплоты абсолютная температура тела непосредственно характеризует интенсивность теплового движения молекул в нем. Нуль абсолютной температуры — это самая низкая теоретически мыслимая температура тела, при которой должно прекращаться тепловое движение молекул. Термометром, который мог бы служить для отсчета абсолютной температуры, был бы термометр, наполненный идеальным газом. Очень близким к нему является газовый термометр, газ в котором находится в условиях, близких к условиям идеального газа.

Абсолютная температурная шкала Томсона была построена им на основе теории тепловых машин Сади Карно. Согласно основному принципу этой теории (принципу Карно), работа в тепловой машине может совершаться лишь при переходе тепла от нагревателя к холодильнику и коэффициент полезного действия машины зависит только от разности их температур. На этом основании Карно построил свой обратимый цикл (цикл Карно) — определенный ряд периодически сменяющихся процессов, происходящих в любом тепловом двигателе. Применив цикл Карно, Томсон в 1850 году обосновал экспериментально установленную им тогда же зависимость точки плавления вещества от давления (понижение точки плавления льда при увеличении давления). Цикл Карно Томсон с успехом применил и в своей термодинамической теории термоэлектрических явлений.

Следует отметить, что, разрабатывая свою теорию, Карно исходил из гипотезы существования теплорода. Он представлял себе, что работа в машине совершается только за счет перехода теплорода от горячего тела к холодному, при котором общее количество теплорода остается неизменным.

В 1851 году независимо от Клаузиуса (см.) Томсон, опираясь на новую, механическую теорию тепла, показал, что эти исходные представления Карно ошибочны и что в действительности работа в тепловой машине происходит за счет *превращения* части теплоты в механическую энергию поршня. Более того, Томсон (равно как и Клаузиус) вскрыл подлинный, глубокий смысл принципа Карно и на его основе в работе «О динамической теории теплоты» (1851 г.) сформулировал один из основных физических принципов — второе начало термодинамики [1]. В формулировке Том-

[1] Первым началом термодинамики является закон сохранения и превращения энергии.

сона этот принцип гласит: при посредстве неодушевленного тела невозможно получить механическое действие от какой-либо массы вещества путем охлаждения ее температуры ниже температуры самого холодного из окружающих тел. Иначе говоря, переход тепла от более холодного тела к менее холодному не может происходить самопроизвольно, он неизбежно сопровождается каким-либо компенсирующим процессом в других телах рассматриваемой системы (тепловой машины), например переходом тепла от какого-то горячего тела к холодному или переходом механической работы в теплоту.

Из второго начала термодинамики, в частности, следует, что в замкнутой системе при взаимных переходах различных видов энергии друг в друга все виды энергии в конечном счете необратимо переходят в теплоту. Ошибочно распространив этот вывод на всю Вселенную, Томсон в 1852 году пришел к заключению о неизбежности рассеивания энергии, или тепловой смерти Вселенной, когда температуры во всех частях Вселенной выравняются и прекратятся все процессы — механические, электрические, химические и т. д., кроме хаотического теплового движения молекул; последнее же будет постепенно затухать за счет рассеивания тепловой энергии в мировом пространстве. К такому же выводу вслед за Томсоном пришел и Клаузиус. Однако многие физики выступили против этой теории. Наиболее решительную критику ее дал в своих работах австрийский физик-материалист Людвиг Больцман.

Некоторые работы Томсона были выполнены им совместно с Джоулем. Сотрудничество их началось после того, как 23-летний Томсон первый обратил внимание английских ученых на важность опытов Джоуля по определению механического эквивалента теплоты.

В 1853—1854 гг. Томсон и Джоуль экспериментально исследовали тепловой эффект при свободном расширении газа, т. е. при расширении его в резервуар с меньшим давлением. Результатом этих опытов было открытие эффекта Джоуля—Томсона, заключающегося в том, что при свободном расширении газ охлаждается или нагревается в зависимости от характерной для каждого газа температуры окружающей среды. Так, при комнатной температуре Джоуль и Томсон обнаружили охлаждение при расширении «в пустоту» углекислого газа, воздуха и кислорода и нагревание водорода. Открытие Джоуля и Томсона легло в дальнейшем в основу метода сжижения таких газов, как кислород, водород, воздух и др., считавшихся прежде «постоянными». Эффект Джоуля—Томсона позволяет оценить степень отличия данного реального газа от идеального газа, для которого этот эффект не имеет места.

После 1840 года Томсон занимался главным образом теоретическими исследованиями в области механики, преимущественно гидродинамики. Ему принадлежат важнейшие исследования распространения волн на поверхности воды, исследования явления приливов и отливов и вихревого движения.

Томсон был убежденным сторонником механистической физики. Все явления в природе он стремился свести к механическим взаимодействиям. В частности, опираясь на представление о существовании особой среды— «мирового эфира», он создал вихревую механическую модель атома, раз-

работал механическую теорию света. Исследования различных моделей механического эфира, начатые Томсоном еще во второй половине 40-х годов, привели его к попытке создать вихревую теорию материи.

До конца жизни Томсон верил в возможность построения единой механистической картины мира. На рубеже XIX и XX вв. он указывал, что на ясном небе науки существуют только два облачка, еще не объясненные на основе механики: тепловое излучение абсолютно черного тела и опыт Майкельсона, обнаруживший постоянство скорости света во всех направлениях как в неподвижных, так и в движущихся системах, что оказывалось в противоречии с самыми основаниями классической механики Галилея — Ньютона.

Правда, под влиянием грандиозных успехов физики в конце XIX — начале XX вв. Томсон несколько отошел от ярко выраженной механистической позиции. Особенно сильное впечатление произвели на него опыты П. Н. Лебедева по доказательству светового давления на тела. Эти опыты заставили Томсона, по его собственным словам, признать электромагнитную теорию света Максвелла. Томсон дожил и до того знаменательного времени, когда рассеялись два таинственных «облачка» науки и физика обогатилась двумя новыми важнейшими областями — теорией квантов (Планка, Эйнштейна) и теорией относительности (Эйнштейна). Эти теории в корне изменили основные представления классической ньютоновской физики. Однако крупнейший представитель этой физики, Томсон уже не мог оценить значение новых открытий и отнесся к ним скептически.

Последняя работа Томсона, вышедшая в год его смерти (1907) и посвященная теории происхождения рентгеновских лучей, называлась «О движениях в эфире, производимых соударением атомов или молекул».

Выдающиеся научные заслуги ученого неоднократно отмечались почестями и наградами. Многие годы Уильям Томсон был президентом Лондонского королевского общества. В 1877 году он был избран членом-корреспондентом, а в 1896 году почетным членом Петербургской академии наук. В 1892 году У. Томсон получил титул лорда Кельвина.

Последние годы жизни великий физик, к тому времени тяжело больной (невралгия лица), жил в своем замке Нисерголл. Умер Уильям Томсон 17 декабря 1907 года в Лондоне и был торжественно похоронен в Вестминстерском аббатстве, недалеко от могилы Ньютона.

ТРУДЫ У. ТОМСОНА (КЕЛЬВИНА)

Второе начало термодинамики. Сади Карно. — В. Томсон-Кельвин — Р. Клаузиус — Л. Больцман — М. Смолуховский. Под ред. и с предисл. А. К. Тимирязева. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934. 311 стр.

В книгу вошли следующие труды У. Томсона: О динамической теории теплоты с численными выводами, полученными на основе джоулевского эквивалента тепловой единицы и наблюдений Реньо над водяными парами. Впервые опубликовано в 1851 году.— О механическом действии лучистой теплоты или света (1852 г.).— О власти одушевленных существ над материей (1852 г.).— О полезных для человека источниках механической работы (1852 г.).— О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии (1852 г.).

Примечания составлены А. К. Тимирязевым.

Томсон В. О преходящих электрических токах. [Пер. С. Майзель]. — В кн.: Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 247—257.

Из работ 1853 г. Первоначально на русском языке эта работа была напечатана в сборнике «Электромагнитные колебания и волны», вып. 2. Под ред. В. К. Лебединского. Спб., 1910, стр. 11—33.

Томсон В. Строение материи. Популярные лекции и речи сэра Вильяма Томсона (лорда Кельвина). Пер. с англ. Б. П. Вейнберга. Под ред. проф. И. И. Боргмана. Спб., Л. Ф. Пантелеев, 1895. 391 стр.

Сборник составлен из лекций и речей В. Томсона, относящихся к 80-м годам XIX столетия: Капиллярное притяжение.— Единицы для электрических измерений.— Упругость, рассматриваемая как возможный род движения.— Величина атомов.— Шаги к кинетической теории материи.— Шесть врат познания.— Волновая теория света.— О возрасте солнечного тепла. — О солнечном тепле. — Электрические измерения. — Прибавления: Молекулярная механика.—Молекулярное строение материи.—Механические изображения магнитного поля.— Эфир, электричество и весомая материя.— О гидростатическом адинамическом строении для «эфира».— Опровержение учения Максвелла—Больцмана, относящегося к распределению кинетической энергии. Решающий пример.

Томсон В. О вихревых атомах. (1867). Пер. Н. М. Лихтгейма, примеч. З. А. Цейтлина. — «Под знаменем марксизма», 1924, № 10—11, стр. 65—77.

То же в кн.: Томсон Д. Д. Электричество и материя. М.—Л., Гос. изд., 1928, стр. 184—198.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ У. ТОМСОНА (КЕЛЬВИНА)

Томсон (Кельвин) Уильям.—БСЭ, 2-е изд., т. 42, 1956, стр. 615—616, портр.

Умов Н. А. Адрес, поднесенный Н. А. Умовым сэру Уильяму Томсону (лорду Кельвину) от имени Московского общества испытателей природы. — В кн.: Умов Н. А. Собрание сочинений. Т. 3. М., 1916, стр. 86—89.

Адрес был составлен Н. А. Умовым для поднесения Томсону на юбилейных торжествах в Глазго 16 июня 1896 года по случаю исполнившегося 50 летия его научной деятельности. Н. А. Умов представлял на этих торжествах Московский университет, Московское общество любителей природы, Московское общество любителей естествознания, антропологии и этнографии.

Умов Н. А. Научная деятельность лорда Кельвина. — В кн.: Умов Н. А. Собрание сочинений. Т. 3. М., 1916, стр. 550—568.

Речь Н. А. Умова на годичном заседании Московского общества испытателей природы 3 (5) октября 1896 года. В речи дана исключительно яркая характеристика Томсона—ученого и человека. Перечислены важнейшие проблемы, разработке которых была посвящена многолетняя творческая деятельность Томсона, наиболее важные его открытия и изобретения.

В конце — коротко о юбилейных торжествах в Глазго 15 июня 1896 года.

Голицын Б. Б. Лорд Кельвин. 1824—1907. Некролог. — «Известия Акад. наук», 1908, № 2, стр. 183—185.

Хвольсон О. Д. Лорд Кельвин (Уильям Томсон).— «Вопросы физики», 1908, вып. 4, стр. 125—135.

Важнейшие даты творческой биографии Томсона. Краткий обзор его теоретических и экспериментальных исследований, начиная с работ по термодинамике.

Ющенко П. Вильямс Томсон (лорд Кельвин). Очерк жизни и деятельности. — «Записки Русского техн. о-ва», 1908, янв., стр. 2—9.

Мокиевский П. Вильям Томсон, лорд Кельвин. — «Русское богатство», 1908, янв., стр. 56—62.

Некролог с кратким обзором научной деятельности.

Пуанкаре А. Лорд Кельвин. — «Физическое обозрение», 1908, т. 9, № 2, стр. 57—72.

Жизнеописание и обзор научной деятельности.

Томпсон С. П. Лорд Кельвин. — «Физическое обозрение», 1908, т. 9, № 5, стр. 256—264.

Популярный очерк научной деятельности.

Похороны лорда Кельвина.— «Физическое обозрение», 1908, т. 9, № 5, стр. 264—266.

Описание траурных церемоний в Глазго и в Вестминстерском аббатстве в Лондоне.

Лебединский В. К. Великий механист. — «Вопросы физики», 1912, вып. 7, стр. 279—284.

Опыт характеристики научно-философских воззрений Уильяма Томсона.

* * *

Лебединский В. К. Вильям Томсон. 1824—1907.— «Электричество», 1924, № 6, стр. 295—300 с портр.

Краткий очерк жизни и деятельности. С большей полнотой содержание его повторено в книге:

Лебединский В. К. Вильям Томсон, лорд Кельвин. 1824—1907. Л., [Акад. наук], 1924. 37 стр.

На небольшом числе страниц автор сумел показать все многообразие научной деятельности Томсона, охарактеризовать глубокий след, оставленный им во всех отраслях физики. Одна из глав посвящена философским воззрениям Томсона.

Книга доступна широкому кругу читателей.

Стеклов В. А. В. Томсон (лорд Кельвин) — математик, физик, философ.— «Электричество», 1924, № 6, стр. 300—309.

Речь на торжественном заседании Российской академии наук в связи со столетием со дня рождения Томсона.

Эйнштейн А. К столетию со дня рождения лорда Кельвина (26 июня 1924 г.).— «Под знаменем марксизма», 1924, № 10—11, стр. 62—64.

Вместо обзора многочисленных проблем, в области которых работал Томсон, Эйнштейн предпочел, как он говорит, на нескольких простых примерах, которые в свое время его интересовали, показать «ясность исследовательского духа» Томсона.

Миткевич В. Ф. Работы В. Томсона (лорда Кельвина) в области электричества. — «Электричество», 1924, № 6, стр. 309—314.

Краткий обзор, заканчивающийся характеристикой общеметодологических воззрений Томсона.

Крутков Ю. А. В. Томсон (лорд Кельвин) и термодинамика. — «Электричество», 1924, № 6, стр. 314—316.

Осадчий П. С. Работы В. Томсона в области телеграфии. — «Электричество», 1924, № 6, стр. 316—322.

Уильям Томсон — крупнейший теоретик и выдающийся инженер-конструктор, автор ряда электрофизических приборов по кабельной телеграфии (краткий исторический обзор). Некоторые выводы из теории распространения электрического тока в телеграфных кабелях, предложенной Томсоном. Сифон-рекордер Томсона.

Шателен М. А. Работы В. Томсона (лорда Кельвина) в области электротехники. — «Электричество», 1924, № 6, стр. 322—326.

Обзор важнейших работ, выполненных Томсоном в области электротехники, дающий все основания считать его «не только физиком, механиком, математиком и философом, но и электротехником, и притом одним из крупнейших».

В этом же номере журнала «Электричество» (стр. 294) напечатан «Адрес», направленный в Лондонское королевское общество от имени Российской академии наук, Русского электротехнического комитета международной электротехнической комиссии и представителей русских научных и технических организаций по случаю столетия со дня рождения Томсона.

* *
*

Пермяков Ф. А. К тридцатилетию со дня смерти В. Томсона. — «Наука и жизнь», 1938, № 1, стр. 58—61.

Краткая биография, важнейшие направления научной деятельности. Преимущественное внимание уделено открытиям Томсона в области техники.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 493—495, 511—512; т. 2, стр. 100—102, 185—186, 240, 260 и др. (см. именной указатель).

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 37, 213—214.

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 80—85, 90—95, 159—161, 255—256 и др. (см. именной указатель).

Лауэ М. История физики, стр. 65, 96, 103, 108, 138.

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского. М., Гостехиздат, 1957, стр. 313—321.

Краткий обзор жизни и творчества В. Томсона, анализ его работ по теории упругости.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 185, 285, 287, 310, 435.



ДЖЕМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ

(1831—1879)

Английскому физику Джемсу Клерку Максвеллу принадлежит заслуга создания математической теории электромагнитного поля и на этой основе — классической электродинамики покоящихся тел.

Первостепенную роль в развитии науки сыграли также труды Максвелла по кинетической теории газов и механической теории теплоты.

Джемс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 года близ Эдинбурга в знатной шотландской семье. По окончании средней школы он изучал математику, физику и механику в университетах Эдинбурга (1847—1850) и Кембриджа (1850—1854). В эти годы большое влияние на Максвелла оказало личное общение с такими выдающимися физиками, как У. Томсон и Д.-Г. Стокс, а изучение трудов Фарадея уже тогда определило направление его научной деятельности. Блестяще окончив Кембриджский университет, Максвелл был оставлен при нем для подготовки к профессорскому званию. С 1856 года он преподавал физику в Абердинском университете (Шотландия), был профессором физики и астрономии в Кинг-колледже Лондонского университета (1860—1865), а с 1871 года занимал кафедру экспериментальной физики Кембриджского университета. Здесь при личном участии Максвелла была создана в 1871—1874 гг. знаменитая физическая лаборатория, которой было присвоено имя английского физика Кэвендиша; ее первым руководителем стал Максвелл.

Ранние исследования Максвелла относятся в основном к математике, механике и физиологической оптике. Свою первую научную работу «О черчении овалов и об овалах со многими фокусами» Максвелл представил в Эдинбургское королевское общество в возрасте 15 лет. Спустя 3 года он сообщил о своей работе по теории равновесия упругих тел, где доказал важную в теории упругости и в строительной механике теорему, впоследствии получившую название теоремы Максвелла. Он исследовал также законы вращения твердого тела. В 1857 году Максвелл получил премию имени знаменитого английского астронома Адамса за научный труд об



Джемс Клерк Максвелл

устойчивости колец Сатурна. Он доказал, что загадочные кольца Сатурна представляют собою рой метеоритов, обращающихся вокруг планеты, тогда как прежде их считали сплошными (твердыми или жидкими).

В период с 1855 по 1872 гг. Максвелл опубликовал также ряд своих экспериментальных исследований по физиологической оптике (о восприятии цветов). Первые статьи Максвелла из этого цикла были отмечены в 1860 году Лондонским королевским обществом медалью Румфорда.

Свои знаменитые исследования в области кинетической теории газов и механической теории теплоты Максвелл начал в возрасте немногим более 20 лет. Исключительно большая заслуга принадлежит ему в разработке математической стороны этих теорий. Максвелл один из первых использовал в теории газов статистические методы (методы теории вероятностей).

В 1860 году в работе «Объяснение динамической теории газов» он впервые описал открытую им важную статистическую закономерность в теории газов. Максвелл установил, что состояние теплового равновесия[1] идеального одноатомного газа, изолированного от воздействия внешних сил, характеризуется определенным распределением его молекул по скоростям. Иначе говоря, число молекул, обладающих данной скоростью или скоростями в данном интервале значений, зависит от значения самой скорости (или интервала скоростей). Это распределение, получившее впоследствии название «распределения Максвелла», не меняется со временем, несмотря на непрекращающиеся хаотические движения и столкновения молекул.

Дальнейшее исследование и обобщение закона распределения Максвелла принадлежит Больцману, Н. Н. Пирогову, Гиббсу, Ричардсону, Штерну и др. Работы этих ученых показали универсальность открытого Максвеллом закона. Он оказался действительным не только для газовых молекул, но и для любых частиц, участвующих в тепловом движении как целое: для молекул без учета движения в них атомов, для атомов без учета движения в них электронов, для электронов, когда не нарушается заметно их тепловое, хаотическое движение (например в полупроводниках). Закон Максвелла при этих условиях применим не только к газам, но и к твердым и жидким телам.

Закон распределения Максвелла (вернее Максвелла—Больцмана) нашел широкое применение при построении теории теплопроводности, электропроводности, внутреннего трения и т. д. в газообразных и конденсированных системах.

Свои исследования в области кинетической теории Максвелл изложил в большом труде «Теория теплоты», который был опубликован в 1870 году.

Широкое распространение получили многочисленные научно-популярные статьи Максвелла, и прежде всего его книга «Материя и движение» (1873 г.).

---

[1] Тепловым равновесием называется такое состояние, когда все параметры (давление, температура, плотность и др.) распределены в данном объеме газа равномерно. Движение молекул при этом характеризуется максимальной хаотичностью, т. е. отсутствием направленных движений отдельных групп молекул.

Однако главным делом всей жизни Максвелла были его теоретические исследования по электромагнетизму.

Стремясь придать гениальным идеям Фарадея об электромагнитном поле четкую и точную математическую форму, Максвелл еще в 1855 году поставил перед собою задачу перевести их на аналитический язык — язык дифференциальных и интегральных уравнений. Многолетняя напряженная работа в этом направлении завершилась в 60-е годы созданием общей математической теории электромагнитного поля. В основу своей теории Максвелл положил фарадеевскую идею поля и новое, введенное Максвеллом, чрезвычайно плодотворное понятие тока смещения, что позволило описать все известные электрические и магнитные взаимодействия системой нескольких (четырех) уравнений и таким образом создать единую математическую теорию электромагнитных процессов.

До Максвелла было известно, что магнитное поле возникает вокруг проводника, если по нему проходит электрический ток (Максвелл называл такой ток током проводимости). В своей теории электромагнитного поля Максвелл выдвинул новую и смелую гипотезу: он утверждал, что магнитное поле возникает и без наличия токов проводимости при условии изменения во времени электрического поля. Иначе говоря, Максвелл утверждал существование явления, обратного явлению электромагнитной индукции.

Следует заметить, что если электрическое поле меняется не в пустоте, а в некоторой диэлектрической среде, то каждое изменение электрического поля действительно вызывает реальное смещение диполей диэлектрика, движение (смещение) зарядов, иначе — электрический ток. Отсюда и произошло название «ток смещения». Этими словами Максвелл называл физическую причину, вызывающую появление магнитного поля при отсутствии проводников с током. В пустоте, как мы теперь знаем, «ток смещения» не связан ни с каким движением зарядов и означает только изменение электрического поля во времени.

В системе уравнений, полученной Максвеллом, два первых уравнения выражают, соответственно, закон электромагнитной индукции Фарадея и открытую Максвеллом «магнито-электрическую» индукцию, связанную с представлениями о токах смещения. Из двух последних уравнений одно выражает известный уже до Максвелла закон сохранения количества электричества, а второе — вихревой характер магнитного поля. В современной форме эти уравнения были даны Г. Герцем и английским физиком О. Хевисайдом.

Математическая теория Максвелла не только объяснила все известные электромагнитные процессы; она привела к новому выдающегося значения открытию — открытию электромагнитных волн — периодически меняющихся и неразрывно связанных друг с другом вихревых электрических и магнитных полей, распространяющихся в пространстве от точки к точке. В самом деле, если в данной точке имеет место меняющееся во времени электрическое поле, то оно возбуждает в соседних точках пространства переменное вихревое магнитное поле, которое в свою очередь возбуждает электрическое поле и т. д. Иными словами, переменное электромагнитное поле распространяется в пространстве.

Теоретические выводы в области электромагнетизма Максвелл начал публиковать еще в 50-е годы в отдельных статьях. Более полно он изложил свою теорию в 1864 году на заседании Лондонского королевского общества и затем опубликовал в своем знаменитом труде «Динамическая теория электромагнитного поля» (1864—1865). В этой работе Максвелл высказал мысль, что свет также представляет собою электромагнитные волны. Из уравнений Максвелла получалось, что скорость распространения электромагнитных волн (следовательно, и света) в пустоте равна отношению электромагнитной и электростатической единиц заряда. Близость этого отношения к скорости света в пустоте была впервые обнаружена еще в 1856 году В. Вебером и Ф. Кольраушем, которые, однако, не придали этому факту особого значения[1]. Интерес к этому удивительному совпадению величин, принадлежащих, казалось бы, совершенно различным областям физики, особенно возрос после появления электромагнитной теории света Максвелла. Точные измерения, произведенные многими физиками (в том числе и Максвеллом), показали практически полное совпадение указанного отношения единиц заряда и скорости света, что долгое время (до опытов Герца в 1887—1888 гг.) было одним из наиболее убедительных, хотя и косвенных доказательств справедливости теории Максвелла.

Исходя из теории электромагнитного поля, Максвелл вывел формулу, связывающую показатель преломления среды с ее диэлектрической постоянной и магнитной проницаемостью, и установил таким образом связь между оптическими и электромагнитными свойствами вещества.

В наиболее полном виде теория электромагнитного поля Максвелла была опубликована в 1873 году в его знаменитом «Трактате об электричестве и магнетизме». В этом сочинении Максвелл сделал, в частности, вывод, что луч света должен производить механическое давление на тела, встречающиеся на его пути, отметив при этом чрезвычайно малую величину этого давления.

К сожалению, преждевременная смерть помешала Максвеллу увидеть торжество своей теории. Только в 1888 году Г. Герц впервые экспериментально доказал существование предсказанных Максвеллом электромагнитных волн и установил в соответствии с теорией Максвелла их конечную скорость и оптические свойства. В 1899 и затем в 1907 гг. П. Н. Лебедев впервые обнаружил и измерил давление света на твердые тела и газы. В начале XX века были получены электромагнитные волны, почти заполнившие разрыв между короткими (в доли микрона) световыми волнами и длинными (не менее 60 *см*) электромагнитными волнами Герца. Наконец, в начале 20-х годов в работах советских физиков А. А. Глаголевой-Аркадьевой и М. А. Левитской световой спектр и спектр волн, возникающих при искровом (колебательном) разряде, сомкнулись. Начатое Максвеллом объединение на одной электромагнитной основе электромагнетизма и оптики было блестяще завершено.

---

[1] В. Вебер и Ф. Кольрауш вычисляли так называемую электродинамическую постоянную в законе Вебера, равную указанному отношению единиц заряда и имеющую смысл некоторой максимальной скорости электрического сигнала в проводах. Их результат был 310 000 *км/сек*.

Успех Максвелла в построении его теории в большой степени объясняется и тем, что вслед за Фарадеем и вопреки господствовавшей в физике того времени теории дальнодействия Максвелл опирался на идею близкодействия, т. е. на идею взаимодействия заряженных тел через посредство некоторой промежуточной среды — поля. Работы Фарадея и Максвелла положили начало новой большой области математической физики — теории поля. С другой стороны, представления Максвелла об этой среде как об упругом мировом эфире, в котором непрерывные электрические и магнитные поля существуют в виде особых, напряженных состояний эфира, — эти механические представления оказались несостоятельными, что выяснилось уже в теории электродинамических процессов Г. А. Лоренца. Окончательно это показал Эйнштейн, в работах которого по теории относительности механический эфир уступил место электромагнитному полю в вакууме как особому виду материи. Вместе с тем математический аппарат теории Максвелла до сих пор плодотворно используется при изучении электромагнитных процессов не только в пустоте, но и в веществе, в тех случаях, когда три основные величины, характеризующие в теории Максвелла электрические и магнитные свойства вещества — диэлектрическая и магнитная проницаемости, а также проводимость — не зависят от частоты и напряженности электрических и магнитных полей в веществе, т. е. являются постоянными и действительно могут характеризовать соответствующие свойства вещества.

Уравнения Максвелла легли в основу электродинамики Г. А. Лоренца и (в измененном виде) были использованы в специальной теории относительности Эйнштейна. В работах этих ученых теория Максвелла нашла свое дальнейшее и наиболее полное развитие.

Максвелл прожил всего 48 лет. Он умер в расцвете творческих сил 5 ноября 1879 года, не успев выполнить многих своих научных замыслов.

ТРУДЫ Д. К. МАКСВЕЛЛА

Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. Пер. З. А. Цейтлина. Под ред. П. С. Кудрявцева. М., Гостехиздат, 1954. 688 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

В этом издании помещены следующие работы Максвелла: О фарадеевых силовых линиях (с примечаниями Л. Больцмана).— О физических силовых линиях (с примечаниями Л. Больцмана). — Динамическая теория электромагнитного поля. — Из «Трактата об электричестве и магнетизме».

В конце тома — примечания редактора и переводчика.

Выдержки из работ Максвелла, опубликованных в этом сборнике, а также статьи «О действии на расстоянии» и «Эфир» напечатаны в кн.: 50 лет радио. Вып. 1. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Под ред. Л. И. Мандельштама. М., Акад. наук СССР, 1948, стр. 63—111.

Труд «О фарадеевых силовых линиях» (с примечаниями Л. Больцмана) в первом издании на русском языке появился в 1907 году.

Максвелл Д. К. Материя и движение. С примеч. и доп. Дж. Лармора. Пер. с англ. Под ред. проф. Н. Н. Андреева. М., Гос. изд., [1924]. XII, 148 стр.; 1 л. портр. (Природа и культура. Кн. 7).

Классический трактат о началах динамики.

Первые русские переводы этого труда были изданы в Петербурге в 1885 и 1899 гг.

Максвелл Д. К. Речи и статьи. Пер. под ред. В. Ф. Миткевича. М.-Л., Гостехиздат, 1940. 228 стр.; 3 л. портр. (Классики естествознания. Физика. Механика. Математика. Астрономия).

В сборник включены следующие работы: О соотношении между физикой и математикой. Доклад математической и физической секции Британской ассоциации, прочитанный в 1870 г.— Значение эксперимента в теоретическом познании. Вводная лекция по экспериментальной физике, прочитанная в 1871 году.—О математической классификации физических величин.—О действии на расстоянии.—Фарадей.—Молекулы. Речь, произнесенная на съезде Британской ассоциации в Бредфорде.—О «Соотношении физических сил» Грова.— «О динамическом доказательстве молекулярного строения тел». Лекция, прочитанная в Химическом обществе 18 февраля 1875 г.— Атом.— Притяжение. — Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц. — Строение тел. — Эфир. — Фарадей.

Статьи «О действии на расстоянии», «Молекулы», «Атом», «Притяжение» и «Эфир» были в первый раз напечатаны на русском языке в кн.: Речи и статьи Джемса Клерка Максвелла. Пер. и изд. Н. Н. Маракуева. М., 1901.

Максвелл Д. К. О регуляторах. — В кн.: Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А. и Стодола А. Теория автоматического регулирования. М., Акад. наук СССР, 1949, стр. 7—29, 369—391.

Работа Максвелла «О регуляторах» и комментарии к ней, составленные акад. А. А. Андроновым и членом-корреспондентом Акад. наук СССР И. Н. Вознесенским.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Д. К. МАКСВЕЛЛА

Максвелл Джемс Клерк (1831—1879).— БСЭ, 2-е изд., т. 26, 1954, стр. 118.

Джемс Клерк Максвелл (1831—1879). Краткий биографический очерк. — В кн.: Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А. и Стодола А. Теория автоматического регулирования. М., Акад. наук СССР, 1949, стр. 323—329, портр.

Кузнецов Б. Г. Джемс Клерк Максвелл. К семидесятипятилетию со дня смерти. — «Техника — молодежи», 1954, № 12, стр. 25—27, портр.

Нейман Л. Р. и **Рахимов Г. Р.** Д. К. Максвелл. К 75-летию со дня смерти. — «Электричество», 1954, № 11, стр. 81—87, портр.

* *
*

Умов Н. А. Памяти Клерка Максуэла.— В кн.: Умов Н. А. Собрание сочинений... Т. 3. М., 1916, стр. 4—52, 538—542.

Речь, составленная «для прочтения на акте» Новороссийского университета, где Н. А. Умов занимал кафедру физики с 1875 по 1893 г. Первоначально речь была опубликована в «Записках Новороссийского университета», 1889, т. 49, часть ученая, стр. 1—50.

Важнейшие проблемы, стоявшие в центре внимания исследовательской деятельности Максвелла, рассмотрены на общем фоне «усилий физических наук» в эпоху Максвелла. Н. А. Умов говорит об идеях, развитых Максвеллом в его теории теплоты, теории газов, динамической теории электромагнитного поля и др.

Примечания А. И. Бачинского.

* *
*

Шостьин Н. А. Джемс Клерк Максвелл как ученый-мыслитель. — «Природа». 1940, № 9, стр. 95—104.

Кравец Т. П. Пути развития максвелловой электромагнитной теории. (К 100-летию со дня рождения Максвелла). — «Природа», 1931, № 11, стлб. 1043—1066, портр.

Кузнецов Б. Г. Электродинамика Максвелла, ее истоки, развитие и историческое значение. (К 75-летию со дня смерти Максвелла). — «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], т. 5, 1955, стр. 136—180, портр.

Лебединский В. К. Д. К. Максвелл и электротехника. — «Архив истории науки и техники», 1933, вып. 1, стр. 97—102.

В статье охарактеризована выдающаяся роль «Трактата об электричестве и магнетизме» Максвелла в обосновании открытий Фарадея и в дальнейшем развитии науки и техники.

Андронов А. А. и **Вознесенский И. Н.** О работах Д. К. Максвелла, И. А. Вышнеградского и А. Стодолы в области теории регулирования машин. — В кн.: Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А. и Стодола А. Теория автоматического регулирования. М., Акад. наук СССР, 1949, стр. 253—262 («Работа Д. К. Максвелла и ее значение»).

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1, стр. 549—552; т. 2, стр. 133—191, 303, 312 и др. (см. именной указатель).

Розенбергер Ф. История физики. Ч. 3, вып. 2, стр. 81, 86, 187, 211—219, 380—382, 395 и др. (см. именной указатель).

Брэгг В. Г. История электромагнетизма. Пер. с англ. М. П. Шаскольской. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 26—36.

На немногих страницах дано глубокое и в то же время простое и ясное истолкование «уравнений электромагнитного поля», разработанных Максвеллом.

Работы Максвелла в области теории упругости и теории сооружений освещены в книге:

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. Пер. с англ. В. И. Контовта под ред. А. Н. Митинского. М., Гостехиздат, 1957, стр. 245—251, 322—330.

ДЖОЗАЙЯ УИЛЛАРД ГИББС

(1839—1903)

Американский физик-теоретик Джозайя Виллард Гиббс родился 11 февраля 1839 года в г. Нью-Хейвне в штате Коннектикут (США). Отец его, как и многие предки Гиббса (шесть поколений подряд), был профессором местного, Иэльского университета, где сначала учился, а затем в течение 32 лет (с 1871 г.) занимал должность профессора математической физики и сам Д. У. Гиббс. Уже в детстве появились выдающиеся способности Гиббса к математике и языкам. Большое влияние оказало на него единственное путешествие по Европе (1866—1869), во время которого он слушал лекции виднейших физиков в университетах Парижа, Берлина и в особенности Гейдельберга, где преподавали в то время Кирхгоф и Гельмгольц.

Первые научные работы Гиббса появились, когда ученому было уже за 30 лет. Гиббс занимался исследованиями в различных областях теоретической физики, но основной и важнейшей заслугой его являются исследования по термодинамике и статистической механике. В этих тесно связанных друг с другом областях физики Гиббс с почти исчерпывающей полнотой развил идеи, заложенные в работах Карно, Клаузиуса, Максвелла и главным образом Больцмана.

Во времена Гиббса существовало два метода решения термодинамических задач. Первый из них, основанный на применении кругового цикла Карно к различным термодинамическим процессам, был неточным. Второй, аналитический метод, имел ограниченную область применения. Общего метода решения термодинамических задач не существовало. Эту задачу впервые разрешил Гиббс.

В работе «О равновесии гетерогенных[1] систем» (опубликована двумя частями в 1875 и 1878 гг.) Гиббс предложил свой метод, согласно ко-

---

[1] Макроскопически разнородных.



Джозайя Уиллард Гиббс

торому изучение термодинамического процесса сводится к изучению некоторых общих функций — термодинамических потенциалов, изменение которых выражает работу системы в данных условиях.

Для решения любой термодинамической задачи достаточно знать термодинамические потенциалы системы.

Гиббс показал большое преимущество нового метода, решив с его помощью ряд фундаментальных термодинамических задач для систем, находящихся в равновесном состоянии. Метод Гиббса и в настоящее время является наиболее общим и в то же время простым и строгим методом решения термодинамических задач.

В дальнейшем Гиббс ввел в термодинамику понятие «потенциала» или, по современной терминологии, химического потенциала, с помощью которого легко решаются все задачи, связанные с вопросами термодинамического равновесия. В той же работе 1875—1878 гг. Гиббс заложил основы термодинамической теории поверхностных явлений, электрохимических процессов, разработал теорию возникновения новых фаз (состояний) физической системы и т. д.

Свой выдающийся труд Гиббс опубликовал в малораспространенном местном научном журнале, и в течение 14 лет о нем почти не знали в ученом мире. Только в 1892 году, после перевода сочинения Гиббса на немецкий и французский языки, перед учеными открылся исключительный по своей мощи теоретический аппарат, созданный Гиббсом.

Вторым крупным трудом Гиббса были его «Элементарные принципы статистической механики, разработанные в направлении рационального обоснования термодинамики» (1902 г.).

В этой работе он в самом общем виде обосновал с точки зрения атомистической природы вещества введенные им термодинамические функции.

Гиббс всегда стремился решать любые задачи в наиболее общем виде и вместе с тем с наибольшей строгостью. Его не удовлетворяло представление различных процессов с помощью механических моделей, неполно выражающих явление и потому недолговечных. Гиббс склонялся скорее к геометрическим интерпретациям. Уже первые его научные работы (1873 г.) назывались «Графические методы в термодинамике жидкостей» и «Метод геометрического представления термодинамических свойств веществ при помощи поверхностей». В этих работах термодинамические свойства веществ выражались с помощью плоских, а затем и трехмерных диаграмм. Графический метод Гиббса нашел широкое применение в теплотехнике.

В работе 1902 года Гиббс предельно расширил понятие геометрической интерпретации термодинамических процессов. Он ввел и широко использовал образ многомерного, так называемого фазового пространства, каждая точка которого изображает микросостояние (микрофазу) [1] данной механической системы в данный момент.

---

[1] Микросостоянием системы называют состояние, характеризуемое определенными значениями координат и скоростей или импульсов молекул, из которых она состоит.

Рассматривая то или иное термодинамическое состояние системы (например объема газа) как результат хаотического движения огромных масс молекул, Гиббс в основу своей системы статистической механики положил уравнения движения в их наиболее общей форме. Поэтому и выводы из его статистической механики имеют самую широкую применимость. Он разработал общие методы нахождения термодинамических потенциалов, функций и средних величин (давление, температура), которые фигурируют в термодинамических уравнениях. На основе статистических соображений Гиббсу впервые удалось теоретически вычислить такую важную термодинамическую константу, как молекулярная теплоемкость газа (т. е. теплоемкость одной молекулы газа).

Метод термодинамических потенциалов, дополненный статистической механикой Гиббса, позволяет решать любые задачи, относящиеся к области термодинамического равновесия. Применимость его затрудняется только сложными вычислительными операциями.

Изучением и дальнейшим развитием идей Гиббса занимался целый ряд ученых: Вант-Гофф, Розебом и др.

Сочинения Гиббса отличаются исключительно трудной внешней формой, которая у физиков даже вошла в поговорку; но под этой формой таится такое богатство идей и глубоких обобщений, что и в наши дни труды его продолжают служить источником новых научных исследований. В нашей стране важные результаты в этом направлении получены С. А. Богуславским, М. А. Леонтовичем, Н. С. Курнаковым и др.

Работа 1902 года связана и еще с одним большим достижением Гиббса. В VII главе этого труда Гиббс впервые, еще до появления флюктуационной гипотезы Больцмана, развил по существу общую теорию флюктуаций (сам термин «флюктуация» Гиббсом не употреблялся).

Помимо этих основных исследований, Гиббсу принадлежат также работы в области электромагнитной и механической теории света, математические исследования в области кристаллографии и небесной механики.

Гиббс занимался и чисто математическими исследованиями. Он является одним из создателей важного математического метода — векторного анализа.

Однако все эти работы не имеют того значения, что его исследования по термодинамике и статистической механике.

К концу жизни Гиббса научные труды его получили мировую известность. Первым ученым, давшим высокую оценку трудам Гиббса, был Максвелл, который в 1878 году прислал ему модель термодинамической поверхности воды, сделанную им на основании теоретических работ Гиббса. Гиббс был избран членом 18 академий и научных обществ, в том числе Лондонского королевского общества, Французской академии наук, Берлинской академии наук. Он имел почетные дипломы от нескольких европейских университетов, медали Коплея (от Лондонского королевского общества) и Румфорда (от Бостонской академии наук).

Умер Гиббс 28 апреля 1903 года.

ТРУДЫ Д. У. ГИББСА

Гиббс Д. В. Термодинамические работы. Пер. с англ. под ред., с предисл. и примеч. проф. В. К. Семенченко. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 492 стр. с илл.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

Содержание: Графические методы в термодинамике жидкостей. — Метод геометрического представления термодинамических свойств веществ при помощи поверхностей.— О равновесии гетерогенных веществ.

Переводы выполнены В. В. Коробовым, Е. П. Шубиной, В. Я. Аносовым, В. П. Древингом и А. В. Киселевым. На стр. 24—26 приводится библиография трудов Гиббса.

Гиббс Д. В. О равновесии разнородных веществ.—«Успехи химии», 1939, т. 8, вып. 5, стр. 646—672.

Автореферат работы Гиббса «О равновесии гетерогенных веществ».

Гиббс Д. В. Основные принципы статистической механики, излагаемые со специальным применением к рациональному обоснованию термодинамики. Пер. с англ. и предисл. К. В. Никольского. М.—Л., Гостехиздат, 1946. 203 стр.; 1 л. портр.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Д. У. ГИББСА

Гиббс Джозайя Уиллард (1839—1903).— БСЭ, 2-е изд., т. 11, 1952, стр. 196—197, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Т. 1. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1929. стр. 242—243.

Дмитриев Л. С. Джошуа Виллард Гиббс.— «Успехи химии», 1939, т. 8, вып. 5, стр. 641—645, портр.

Ребиндер П. А. Джошуа Виллард Гиббс. (К столетию со дня рождения).— «Успехи физ. наук», 1939, т. 21, вып. 4, стр. 377—381, портр.

Семенченко В. К. Джосиа Виллард Гиббс. Его жизненный путь и основные работы.— В кн.: Гиббс Дж. В. Термодинамические работы. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 11—26.

Семенченко В. К. Работы Гиббса по статической механике. — «Успехи химии», 1953, т. 22, стр. 1278—1284.

Семенченко В. К. Д. В. Гиббс и его основные работы по термодинамике и статистической механике. (К 50-летию со дня смерти).— «Успехи химии», 1953, т. 22, вып. 10, стр. 1278—1284.

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 93—96, 108 и др. (см. именной указатель).

АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ СТОЛЕТОВ

(1839—1896)

Александр Григорьевич Столетов родился 29 июля (10 августа) 1839 года в г. Владимире в небогатой купеческой семье. Еще в годы учения в гимназии он особенно интересовался физикой. В 1856 году Столетов поступил на физико-математический факультет Московского университета. После окончания его в 1860 году он был оставлен при университете для подготовки к профессорскому званию. Однако получить здесь серьезную подготовку по физике Столетов не мог: преподавание физики в Московском университете в те годы стояло на невысоком уровне.

Физическое образование А. Г. Столетов серьезно пополнил во время своего пребывания в заграничной командировке в Германии, куда он как один из лучших был направлен в 1862 году. «Истинным откровением» были для него лекции знаменитого Кирхгофа в Гейдельбергском университете. «Физическая наука в ее идеальном виде, как сочетание теоретической мысли с экспериментальным искусством, предстала нам здесь впервые в лице великого творца спектрального анализа», — вспоминал впоследствии Столетов [1].

Большое влияние на Столетова оказали также лекции Гельмгольца; работа в Берлине у немецкого физика Магнуса, лаборатория которого являлась в то время едва ли не первой школой экспериментальной физики в Европе; занятия под руководством В. Э. Вебера в Геттингене; изучение трудов У. Томсона и К.-Ф. Гаусса.

В 1866 году Столетов возвратился в Московский университет, где в 1873 году получил звание профессора. Он развил большую деятельность по коренной реорганизации преподавания физики. Ценой больших усилий ему удалось добиться создания первой физической лаборатории в университете. Но заветной мечте Столетова—организации при университете Фи-

[1] Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2, М.—Л., 1941, стр. 420.

зического института — не суждено было исполниться при его жизни. Физический институт был открыт уже после смерти А. Г. Столетова.

Заботясь о развитии в России экспериментальной физики, Столетов в то же время глубоко понимал значение серьезной постановки преподавания теоретической физики. Его собственные лекции имели исключительный успех.

С первых же дней пребывания в университете А. Г. Столетов начал свои научные исследования, сосредоточив внимание главным образом на изучении электрических и магнитных явлений. Первые работы Столетова были посвящены общим вопросам электростатики и явлению намагничивания тел. В своей докторской диссертации («Исследование о функции намагничения мягкого железа», 1872 г.) Столетов, помимо полученных им ценных научных фактов, разработал новую методику исследования магнитной восприимчивости, которая нашла потом широкое применение в электротехнике.

В университете А. Г. Столетов начал серьезные научные исследования и в области экспериментальной физики. Результатом его первой экспериментальной работы, проделанной в начале 70-х годов, было создание оригинального метода измерения чрезвычайно важной для физики того времени величины — так называемой электродинамической постоянной, равной отношению электромагнитной и электростатической единиц заряда (см. очерк о Максвелле). До опытов Г. Герца (1888 г.), окончательно установившего существование электромагнитных волн и доказавшего электромагнитную природу света, измерение отношения единиц электрического заряда было одним из очень важных, хотя и косвенных способов проверки справедливости теории Максвелла. Поэтому чрезвычайно точная методика измерения этого отношения, разработанная Столетовым вскоре после опубликования теории Максвелла, имела особенно большое значение и была высоко оценена Максвеллом.

Однако основными работами Столетова в области экспериментальной физики, принесшими ему всемирное признание и славу, были его классические исследования внешнего фотоэффекта — возникновения электрического тока между двумя изолированными друг от друга электродами при освещении одного из них, заряженного отрицательно. Столетов назвал это явление актино-электрическим.

Явление внешнего фотоэффекта открыл в 1887 году Генрих Герц[1] Открытие Герца, опубликованное им в том же году, сразу привлекло внимание многих физиков. Немецкий физик Галльвакс, итальянский физик Риги и др. сосредоточили свое внимание на изучении вопроса: как изменяется потенциал проводника под действием света. К 1888 году в подтверждение первых выводов Герца было установлено, что освещение светом разряжает проводник (уменьшает его потенциал), причем только в том случае, если проводник заряжен отрицательно и если свет ультрафиолетовый. Источником света служила электрическая дуга (что также впервые было предложено Герцем) — в то время единственный

[1] Впервые явление внешнего фотоэффекта наблюдал французский физик Ходон в 1885 г., опубликовавший эти наблюдения, однако, лишь в 1889 г.



Александр Григорьевич Столетов

мощный источник коротковолнового излучения. В 1888 году Риги назвал новое явление фотоэффектом.

В том же 1888 году исследованием фотоэффекта занялся А. Г. Столетов.

До Столетова в качестве количественной характеристики фотоэффекта обычно принималось изменение потенциала проводника под действием света, иными словами — электростатическое проявление фотоэффекта. Измерения производились при помощи электрометра. Однако, несмотря на высокую чувствительность этого прибора, исследования в этом направлении не привели к установлению каких-либо количественных закономерностей. Как выяснилось впоследствии, изменение потенциала проводника зависит, помимо освещения, от многих факторов. Этим в большой мере объясняется то, что до Столетова не было внесено ничего принципиально нового в изучение фотоэффекта, кроме подтверждения основных выводов Герца.

Большая научная заслуга Столетова состоит в том, что он впервые сумел выделить фотоэффект в наиболее чистом виде и в качестве количественной характеристики этого явления использовал величину, наиболее четко его характеризующую. Такой величиной является фототок, которым, как теперь известно, непосредственно характеризуется количество электронов, выбиваемых квантами света с поверхности катода.

Столетов сконструировал прибор, состоявший из включенных в одну цепь плоского сетчатого конденсатора [1] и чувствительного гальванометра. Отрицательно заряженная сплошная пластинка конденсатора освещалась светом электрической дуги, помещавшейся за второй, сетчатой пластинкой конденсатора. В цепи при этом возникал, исключительно за счет освещения, электрический ток, сила которого измерялась гальванометром. Сетчатый конденсатор Столетова был не чем иным, как первым фотоэлементом.

В результате двухлетних (1888—1890) исследований А. Г. Столетов установил все основные количественные закономерности фотоэффекта, какие только можно было установить в то время, когда еще не был открыт электрон, когда ничего не знали о квантах света, когда, следовательно, не была и не могла быть известна сама природа фотоэффекта (выясненная впервые Эйнштейном в 1905 г.).

Изучая это явление при различных давлениях воздуха, Столетов установил, что сила фототока растет с увеличением давления, достигая при некотором давлении, которое Столетов назвал критическим, максимума. Большую роль в дальнейшем изучении газового разряда (так называемого несамостоятельного разряда) и в деле изготовления газонаполненных фотоэлементов сыграло установление Столетовым того факта, что отношение разности потенциалов на обкладках сетчатого конденсатора к критическому давлению всегда остается постоянным.

В опытах по фотоэффекту при малых давлениях Столетов открыл существование тока насыщения, когда с увеличением освещения фототок

---

[1] Конденсатор, у которого одна пластинка была сплошной, а противоположная ей представляла собою металлическую сетку, пропускавшую свет.

перестает расти (т. е., когда, как мы теперь знаем, с поверхности катода отрываются все электроны, способные быть оторванными световыми квантами данной энергии).

На основании этих опытов он высказал глубокую мысль о том, что, хотя воздух и влияет существенно на протекание фотоэффекта, в основе этого явления лежит непосредственное взаимодействие света и вещества. Столетов первый отметил, что фотоэффект тесно связан с поглощением света в тонком поверхностном слое, из которого, как известно, и вырываются фотоэлектроны.

К 1889 году относится открытие Столетовым одного из основных законов фотоэффекта — закона пропорциональности между силой фототока и силой света при условии постоянства спектрального состава света (так называемый первый закон фотоэффекта). Этот закон лежит в основе современной фотоэлектрической фотометрии. Исследуя различные вещества на фоточувствительность, Столетов открыл, что фотоэлементами могут быть и жидкости и что особенно высокой чувствительностью обладают некоторые красители. В настоящее время это открытие Столетова используется для увеличения чувствительности щелочных фотоэлементов.

Наконец, Столетову принадлежит и открытие таких исключительно важных явлений, как утомляемость фотоэлемента (им же впервые был предложен способ уменьшения этого эффекта), а также безынерционность фотоэффекта. Путем предельно точных по тому времени измерений Столетов установил, что фототок запаздывает по сравнению со временем начала освещения не более чем на 1/1000 *сек* [1].

Следует отметить, что Столетов впервые применил фотоэлемент — для контроля режима электрической дуги.

Своими точными количественными исследованиями внешнего фотоэффекта, описание которых уместилось в пяти небольших статьях, А. Г. Столетов заложил основы изучения фотоэффекта — явления, которое нашло необычайно широкое применение во многих областях физики и без которого немыслимы такие отрасли новейшей техники, как телевидение, автоматика, телемеханика.

В последние годы своей жизни Столетов занимался исследованиями состояния вещества в области критической температуры.

Наряду с той большой ролью, которую А. Г. Столетов сыграл как ученый, исключительно важной заслугой его перед русской наукой является громадная педагогическая работа, создание им подлинно научной системы преподавания физики в Московском университете, основание школы физики, из которой вышли Н. А. Умов, Н. Н. Шиллер, Р. А. Колли, А. П. Соколов, Д. А. Гольдгаммер и многие другие русские ученые. В дальнейшем подобные школы стали создаваться и в других городах нашей страны.

Большую роль для развития и распространения русской науки сыграла обширная популяризаторская деятельность Столетова. А. Г. Столетов

---

[1] В настоящее время известно, что даже искра, длящаяся $3 \cdot 10^{-9}$ *сек*, способна еще вызывать фотоэффект.

был выдающимся, талантливым пропагандистом научных знаний. Ему принадлежит целый ряд ярких и глубоких характеристик русских и зарубежных ученых, научно-критические статьи, среди которых особенно выделяются его блестящие статьи «Очерк развития наших сведений о газах» (1878 г.), «О критическом состоянии тел» (1882—1894) и др.

Столетов первым из русских физиков стал выступать на международных научных конгрессах.

По своим философским взглядам А. Г. Столетов был убежденным материалистом. Он вел активную борьбу против распространившихся в физике в конце XIX века лженаучных философских и физических учений — «махизма» и «энергетизма».

Прогрессивные взгляды Столетова, его выступления в защиту передового студенчества обострили его отношения с правительственными кругами. В 1893 году кандидатура Столетова на выборах в Академию наук была неожиданно снята, что тяжело отразилось на душевном состоянии ученого.

А. Г. Столетов умер в ночь на 27 мая 1896 года в Москве.

ТРУДЫ А. Г. СТОЛЕТОВА

Столетов А. Г. Собрание сочинений. Под ред., с предисл. и примеч. проф. А. К. Тимирязева. Т. 1—3. М.—Л., Гостехиздат, 1939—1947.

Т. 1. Оригинальные исследования. Научно-критические статьи. Письма и заметки. 1939. 464 стр.; 1 л. портр.

Обе диссертации А. Г. Столетова (магистерская и докторская), «Актино-электрические исследования», «Об одном методе определения отношения электромагнитных и электростатических единиц», «О критическом состоянии тел» (статьи 1—4) и др.

Т. 2. Общедоступные лекции и речи, критические и биографические заметки. 1941. 436 стр.; 1 л. портр.

В томе собраны работы, посвященные главным образом выдающимся математикам, физикам, естествоиспытателям: Леонардо да Винчи, Ньютону, Кирхгофу, С. В. Ковалевской, Гельмгольцу и др.

Т. 3. Введение в акустику и оптику. Теория теплоты. 1947. 624 стр.: 1 л. илл.

Столетов А. Г. Избранные сочинения. Под ред. и с примеч. проф. А. К. Тимирязева. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 659 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

В первый раздел тома вошли основные научные труды А. Г. Столетова: «Общая задача электростатики и ее приведение к простейшему случаю», «Исследование о функции намагничения мягкого железа», «Заметка о функции намагничения различных железных тел», извлечение из «Речей и протоколов VI съезда русских естествоиспытателей и врачей в С.-Петербурге», «Об одном методе определения отношения электромагнитных и электростатических единиц», «Актино-электрические исследования», «Продолжение актино-электрических исследований», «Об актино-электрических токах в разреженных газах», «Заметки о критическом состоянии тел» (все четыре статьи) и др.

Во втором разделе напечатаны следующие статьи и речи: «Очерк развития наших ведений о газах», «Эфир и электричество», «Ньютон как физик», «Гельмгольц и современная физика», «Леонардо да Винчи как естествоиспытатель», очерки жизни и научно-педагогической деятельности русских физиков Р. А. Колли и М. П. Авенариуса.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. Г. СТОЛЕТОВА

Капцов Н. А. Столетов, Александр Григорьевич (1839—1896).— БСЭ, 2-е изд., т. 41, 1956, стр. 34—35, портр.

Тимирязев К. А. Александр Григорьевич Столетов. Биографический очерк.— В кн.: Столетов А. Г. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 13—40, портр.

Очерк напечатан также в кн.: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1911, стр. 3—28, портр.

А. Г. Столетов характеризуется как выдающийся русский физик, ученый, мыслитель, первоклассный педагог, организатор науки и блестящий популяризатор. Статья представляет собою речь, которую К. А. Тимирязев должен был произнести на торжественном заседании Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете, посвященном памяти А. Г. Столетова (1896 г.). Выступление, однако, не состоялось, так как было запрещено университетским начальством.

Яркая характеристика научной, педагогической и популяризаторской деятельности А. Г. Столетова дана в речах Н. Е. Жуковского и П. Н. Лебедева на том же заседании:

Жуковский Н. Е. О деятельности А. Г. Столетова в Обществе любителей естествознания.— В кн.: Жуковский Н. Е. Собрание сочинений. Т. 7. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 189—191.

Лебедев П. Н. Экспериментальные работы А. Г. Столетова.— В кн.: Лебедев П. Н. Собрание сочинений. М., Моск. физ. о-во им. П. Н. Лебедева, 1913, стр. 277—286.

Непосредственным откликом на смерть А. Г. Столетова является также статья:

Гольдгаммер Д. А. Памяти профессора А. Г. Столетова.— «Известия физ.-математ. о-ва при Казан. ун-те», вторая серия, 1897, т. 7, № 1, стр. 39—54.

* *
*

Глаголева-Аркадьева А. А. Александр Григорьевич Столетов. К 100-летию со дня рождения.— «Физика в школе», 1939, № 4, стр. 3—7.

Елисеев А. А. Александр Григорьевич Столетов. (К 50-летию со дня смерти).— «Физика в школе», 1946, № 2, стр. 23—42.

Глаголева-Аркадьева А. А. Александр Григорьевич Столетов. (1839—1896).— В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 133—142, портр.

Лазарев П. П. А. Г. Столетов. (Биография).— В кн.: Лазарев П. П. Очерки истории русской науки. Под ред. акад. С. И. Вавилова и проф. М. П. Воларовича. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 167—176.

То же в кн.: Лазарев П. П. А. Г. Столетов, Н. А. Умов, П. Н. Лебедев, Б. Б. Голицын. Л., Науч. хим.-техн. изд. НТУ ВСНХ, 1927, стр. 9—19.

Капцов Н. А. Научные работы Александра Григорьевича Столетова.— «Ученые записки Моск. гос. ун-та. Юбилейная серия». Вып. 52. Физика. 1940, стр. 71—80.

Тимирязев А. К. А. Г. Столетов.— В кн.: Очерки из истории физики в России. Пособие для студентов и учителей. М., Учпедгиз, 1949, стр. 93—103, илл. и портр.

Тимирязев А. К. Александр Григорьевич Столетов — основатель русской физики.—«Успехи физ. наук», 1939, т. 22, вып. 4, стр. 369—383.

Стенограмма доклада, прочитанного 15 сентября 1939 года на торжественном соединенном заседании Ученого совета физического факультета и общего коллоквиума Института физики МГУ по случаю столетия со дня рождения А. Г. Столетова.

Тимирязев А. К. Александр Григорьевич Столетов. 1839—1896. М., Моск. гос. ун-т, 1948. 49 стр.; 1 л. портр. (Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч. б-ка им. А. М. Горького. Замечат. ученые Моск. ун-та. Вып. 2).

Очерк состоит из двух глав. Первая представляет собой обзор научной и преподавательской деятельности А. Г. Столетова. Вторая целиком посвящена общественно-политической борьбе А. Г. Столетова, характеристике обстановки, в которой протекала его научная и педагогическая деятельность.

Болховитинов В. Н. Александр Григорьевич Столетов. 1939—1896. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1953. 511 стр., с илл. и портр.; 23 л. илл. и портр. (Жизнь замечат. людей).

Наиболее крупная биография А. Г. Столетова. Главы книги: Годы странствий.— На университетской скамье.— Столетовский кружок.— Тайна железа.— Основатель школы русских физиков. — В боях за передовую науку.

Компанеец А. И. Мировоззрение А. Г. Столетова. М., Акад. наук СССР, 1956. 288 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Ин-т философии).

Главы книги. Жизненный путь и формирование мировоззрения А. Г. Столетова.— Материалистические воззрения А. Г. Столетова.—Роль А. Г. Столетова в развитии физики.— Борьба А. Г. Столетова против махизма и энергетизма.

В работе приводятся некоторые неопубликованные труды А. Г. Столетова из архивов Академии наук СССР, Московского университета, Московского общества испытателей природы, Политехнического музея и др.

* *
*

Работам А. Г. Столетова по исследованию фотоэффекта, заложившим основы современной электроники, посвящены статьи:

Хлебников Н. С. Работы А. Г. Столетова по фотоэффекту.— «Успехи физ. наук», 1939, т. 22, вып. 4, стр. 384—394.

В статье приводится резюме фотоэлектрических исследований А. Г. Столетова, составленное им самим.

Соминский М. С. Исследования А. Г. Столетова в области актиноэлектрических явлений. (К 60-летию открытия основных закономерностей внешнего фотоэффекта).— «Природа», 1948, № 11, стр. 71—74.

Борзяк П. Г. Начальный период истории внешнего фотоэффекта и значение работ Столетова. (К 60-летию со дня смерти А. Г. Столетова).— «Успехи физ. наук», 1956, т. 58, вып. 4, стр. 715—747.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 78—80, 187—189, 313—317, 394—412 и др. (см. именной указатель).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 350—351, 446—447.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Гаухман Р. П. Библиография печатных трудов А. Г. Столетова. Критико-биографические работы о А. Г. Столетове.— В кн.: Александр Григорьевич Столетов. 1839—1896. М., Моск. гос. ун-т, 1948, стр. 37—49.

Болховитинов В. Н. Александр Григорьевич Столетов. 1839—1896. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1953, стр. 505—510.

Библиография основных трудов А. Г. Столетова и основной литературы о нем.

Компанеец А. И. Мировоззрение А. Г. Столетова. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 281—286.

Труды А. Г. Столетова. — Труды, вышедшие под его редакцией. — Письма А. Г. Столетова и письма к нему.

ЛЮДВИГ БОЛЬЦМАН

(1844—1906)

Людвиг Больцман — один из крупнейших физиков XIX столетия — родился 20 февраля 1844 года в Вене. Окончив в 1866 году Венский университет, он получил докторскую степень и стал ассистентом известного физика Иозефа Стефана (1835—1893), а через год приват-доцентом физики. В 25 лет Больцман был уже профессором в университете г. Граца (Австрия). В Граце Больцман прожил с небольшим перерывом около 20 лет (1869—1873, 1876—1890). С 1876 года одновременно с преподаванием в университете он руководил только что созданным в Граце физическим институтом — одним из крупнейших в Европе того времени. Кроме того, в разные годы Больцман был профессором математики и физики в университетах Вены, Мюнхена, Лейпцига.

Среди обширного списка научных работ Больцмана особенно выделяются его исследования по кинетической теории газов, заложившие основы классической статистической физики, и работы, посвященные статистическому обоснованию 2-го начала термодинамики.

Эти фундаментальные исследования Больцмана были проведены им в Граце. Они быстро принесли ученому всемирную известность. Больцман был членом 39 академий и научных обществ.

Основной идеей, пронизывающей все творчество Больцмана, была идея молекулярно-кинетической природы материи. Эту идею он развивал и неустанно пропагандировал в своих научных работах, лекциях, в блестящих научно-популярных статьях.

В работе 1871—1872 гг. Больцман обобщил открытый Максвеллом [1] статистический закон, которому подчиняется движение молекул идеального газа, находящегося в состоянии теплового равновесия [2]. Больцман

---

[1] Максвелл установил его в 1859 г. для идеального одноатомного газа.

[2] Тепловым равновесием газа принято считать такое его состояние, когда все параметры (давление, температура и др.) распределены в данном объеме газа равномерно.



Людвиг Больцман

распространил его сначала на случай многоатомных молекул, а затем и на случай смеси газов [1]. При этом он учитывал не только поступательное движение молекул в газе, но и вращательное их движение, колебание атомов в молекуле, а в дальнейшем (1875 г.) — и действие на такой газ внешних сил. Эти исследования позволили установить распределение молекул идеального газа по состояниям, в настоящее время широко известное под именем «больцмановского распределения». Оно используется не только в теории идеальных газов, но и всюду, где применяется классическая статистика, в частности в электронной теории проводников и диэлектриков, при исследовании процесса испускания электронов накаленными поверхностями металлов, в электронной теории магнетизма, в теории распределения и движения звезд в звездных системах — галактиках (звездная динамика) и т. д.

Больцман доказал стационарность, а затем (1872 г.) и единственность открытого им закона распределения. Эти доказательства он провел с помощью своего общего газокинетического (или кинетического) уравнения, впервые сформулированного им в 1872 году, а в более общем виде — в 1875 году в работе «О тепловом равновесии в газе, на который действуют внешние силы». В настоящее время это уравнение является основой всей физической кинетики — теории физических процессов при приближении неравновесных систем к состоянию термодинамического равновесия.

В той же работе 1875 года Больцман в наиболее общем виде доказал свою знаменитую Н-теорему.

Он установил, что свойства замкнутой термодинамической системы (например некоторого объема газа) могут быть однозначно охарактеризованы некоторой функцией, обозначенной им через «Н». Эта функция, как показал в дальнейшем Больцман, имеет статистический характер, т. е. она характеризует не само состояние системы, а только вероятность того или иного состояния.

В Н-теореме Больцман доказал, что эта функция не может возрастать, т. е., аналогично энтропии системы, она может изменяться лишь в одном направлении. Таким образом, энтропия оказывалась также статистической функцией.

Доказательство этой теоремы — наибольшая заслуга Больцмана, так как с ее помощью он пришел к выдающемуся открытию — установлению статистического характера 2-го начала термодинамики.

Впервые в истории учения о теплоте Больцман показал, что закономерности термодинамических явлений имеют особый, статистический характер и что, следовательно, можно говорить не об определенном направлении течения тепловых процессов, а лишь о вероятности того или иного направления. Это было огромной победой в развитии всей кинетической теории материи, так как уничтожало основное возражение против нее — противоречие между обратимостью механических движений частиц и 2-м началом, которое в формулировке феноменологической термодинамики устанавливало необратимость тепловых процессов.

---

[1] Всюду имеется в виду идеальный газ.

Больцман дал свою формулировку 2-го начала термодинамики: возрастание является лишь наиболее вероятным изменением энтропии при определенных условиях (в начальный момент система должна быть в маловероятном состоянии, т. е. в состоянии, сильно отличающемся от термодинамического равновесия).

Исходя из такого понимания 2-го начала термодинамики, Больцман выступил с решительной критикой теории «тепловой смерти» Вселенной Клаузиуса—Томсона, согласно которой в силу необратимости термодинамических процессов энергия всех тел должна рано или поздно перейти в тепловую и рассеяться в мировом пространстве. Впрочем, представления о «тепловой смерти» в применении к бесконечной Вселенной, как показало дальнейшее развитие науки, являются во всех отношениях несостоятельными. Это отмечал уже Больцман. В своих «Очерках методологии физики» он писал: «Но такое заключение (о неизбежности тепловой смерти. — *С. Е.*) само собою понятно только в том случае, если представлять себе мир конечным и подчиняющимся второму закону»[1].

Исключительно важным оказалось введенное Больцманом в связи с его критикой теории «тепловой смерти» понятие флюктуаций.

Флюктуации[2] — это в широком смысле беспорядочные отклонения случайных величин от их средних значений. Под случайными понимаются здесь величины, характеризующие явления, в которых участвуют огромные количества в общем независимых друг от друга частиц. Примерами таких величин служат температура тела, давление газа, напряжение и сила тока и т. п.

Существование флюктуаций особенно ярко отражает статистический характер закономерностей «массовых», в частности, термодинамических явлений. В состоянии теплового равновесия, согласно прежней, феноменологической теории, температура тела, например, должна быть одной и той же в любой точке тела. По теории же Больцмана в таких условиях самопроизвольно могут возникать разности температур между отдельными участками тела или совершаться работа за счет теплоты (перемещение броуновских частиц за счет теплового движения молекул), иными словами — процессы в какие-то, обычно малые, промежутки времени могут идти в направлении от более к менее вероятному состоянию.

Наиболее полная статистическая теория флюктуаций была дана в дальнейшем, в работах о броуновском движении, Эйнштейном и Смолуховским. В настоящее время изучению флюктуаций физических величин уделяется очень большое внимание, прежде всего в области радио- и электроаппаратуры, где разработаны различные способы для уменьшения, например, флюктуаций токов в проводниках, полупроводниках и электронных лампах («шумы»).

Большое место в научном творчестве Больцмана занимают его исследования в области электромагнетизма. Он был убежденным сторонником и ревностным пропагандистом теории Максвелла еще в то время,

---

[1] Больцман Л. Очерки методологии физики. М., 1929, стр. 130.

[2] От лат. fluctuatio — колебание.

когда эта теория не была окончательно признана. В 70-е годы Больцман провел обширные экспериментальные исследования с целью доказать справедливость выведенного Максвеллом соотношения между показателем преломления и диэлектрической постоянной вещества. Больцман определил диэлектрическую постоянную не только для твердых диэлектриков (сера, парафин), но и для газов (воздух, водород, кислород и углекислый газ).

Больцману принадлежит также ряд важных теоретических исследований в области электромагнетизма: обоснование светового давления, работы по теории термоэлектричества, диамагнетизма и многие другие.

С термодинамикой и электродинамикой были тесно связаны исследования Больцмана по тепловому излучению. В 1884 году, исходя из термодинамических представлений и представлений о давлении света, он теоретически вывел основной закон излучения абсолютно черного (см. очерк о Кирхгофе) тела. Несколько ранее этот закон был экспериментально установлен австрийским физиком Стефаном, который ошибочно считал его применимым к любым телам. Закон Стефана — Больцмана играет большую роль в науке, особенно в астрофизике, позволяя определять температуру звезд по их полному излучению.

Обоснование Больцманом этого закона имело очень большое значение для дальнейшего развития термодинамики. Оно положило начало развитию термодинамики лучистой энергии, которое завершилось созданием теории квантов (Планк, 1900 г.; Эйнштейн, 1905 г.).

Больцман вел научные исследования и в других областях физики — по теории упругости тел, теплоемкости газов, изучал капиллярные явления и т. д. Но все эти работы не имеют того значения, как его работы по электродинамике и особенно по термодинамике и кинетической теории газов, в которых он развивал идеи кинетической природы материи.

В конце XIX века защита этих идей Больцманом превратилась в настоящую борьбу за них. Бурный успех механики и механистического объяснения явлений, приведший в свое время к созданию механической теории теплоты, к молекулярно-кинетическому истолкованию закона сохранения энергии, сменился к этому времени реакцией. Реальность атомов и молекул и их теплового движения еще не была окончательно установленным фактом. Необратимость тепловых процессов никак не вязалась с механической теорией теплоты, так как механические движения частиц вполне обратимы. Первые попытки использовать атомистические представления в области электромагнитных явлений, применить их к теории Максвелла также не дали положительных результатов.

На почве всех этих трудностей, начиная со второй половины XIX века, в физике возникло направление «описательной», или феноменологической физики. Сторонники этого направления считали принципиально невозможным проникнуть в глубь явлений и все попытки раскрыть механизм тех или иных явлений объявили ненаучными. Они свели задачи физики к чистому описанию явлений и закономерностей в них. Изучение различных превращений энергии, все более и более подтверждавшее всеобщность закона сохранения и превращения энергии, привело некоторых физиков к ошибочному выводу, что энергия является единственной

реальностью. Это течение в физике, родоначальником которого был немецкий ученый Вильгельм Оствальд, получило название «энергетизма».

На той же почве трудностей механики родилась и философская концепция немецкого физика Эрнста Маха, который вообще отрицал объективную реальность мира и все воспринимаемые нами явления рассматривал как результат субъективных ощущений.

В такой обстановке атомистические идеи Больцмана и разрабатываемая им кинетическая теория материи нередко объявлялись ошибочными и антинаучными. Его статистическое толкование 2-го начала термодинамики, замечательные идеи о статистическом характере закономерностей тепловых процессов были слишком новы, и, несмотря на всемирную известность Больцмана как ученого, современники отнеслись к ним с неверием.

Тем не менее Больцман твердо держался своих убеждений и горячо защищал их. Особенно яркими в этом отношении были его лекции по натуральной философии, которые он начал читать с 1902 года в Венском университете и которые составили замечательный сборник «Очерки методологии физики». Мировоззрение Больцмана было по существу глубоко материалистическим, хотя сам он отрицал это. Его высказывания о значении теории, о роли гипотез и практики в создании теории, его решительные выступления против идеалистических направлений в физике — «энергетизма» и «махизма» — сыграли крупную прогрессивную роль в идейной борьбе в естествознании конца XIX и начала XX вв. Высоко ценил Больцмана В. И. Ленин. Он писал: «Из немецких физиков систематически боролся против махистского течения умерший в 1906 году Людвиг Больцман... «увлечению новыми гнесеологическими догмами» он противопоставлял простое и ясное сведение махизма к солипсизму;... его теория познания по существу дела материалистическая» [1].

Первые работы, подтвердившие справедливость идей и теорий Больцмана, появились лишь в начале XX века (Эйнштейн — 1905 г., Смолуховский — 1906 г., Ланжевен — 1908 г., Ж. Перрен — 1908 г.). Однако Больцману уже не пришлось их увидеть: 5 сентября 1906 года он застрелился.

ТРУДЫ Л. БОЛЬЦМАНА

Больцман Л. Лекции по теории газов. Пер. с нем. под ред. Б. И. Давыдова. М., Гостехиздат. 1956. 554 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

Классические исследования Больцмана по кинетической теории газов были первоначально опубликованы в ряде статей, появившихся с 1865 года в Докладах Венской академии наук и в других научных журналах. Курс лекций по теории газов, являющийся итогом работ ученого, был выпущен в 1896 и 1898 гг. Книга состоит из двух частей:

Часть первая. Теория газов с одноатомными молекулами, размеры которых исчезающе малы по сравнению со средней длиной пути.

Часть вторая. Теория Ван-дер-Ваальса; газы со сложными молекулами; теория диссоциации газов; заключительные замечания.

---

[1] Ленин В. И. Сочинения. Т. 14, стр. 274.

Больцман Л. Второй закон механической теории теплоты.— О статистической механике. Пер. Ю. Е. Бараца.— В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физика. Под ред. А. К. Тимирязева. Вып. 1. М.—Пг., Гос. изд., 1923, стр. 144—178.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Л. БОЛЬЦМАНА

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии.— Сочинения. Т. 14, стр. 85, 251, 274—277, 284.

В. И. Ленин высоко оценил философское значение трудов Л. Больцмана. «Из немецких физиков,— писал он,— систематически боролся против махистского течения умерший в 1906 году Людвиг Больцман... «увлечению новыми гносеологическими догмами» он противопоставлял простое и ясное сведение махизма к солипсизму... Больцман, конечно, боится назвать себя материалистом и даже специально оговаривается, что он вовсе не против бытия божия. Но его теория познания по существу дела материалистическая...» (стр. 274).

Больцман Людвиг (1844—1906).— БСЭ, 2-е изд., т. 5, 1950, стр. 501—502.

Баклаев В. Г. Замечательный ученый-материалист. (К 50-летию со дня смерти Людвига Больцмана).— «Наука и жизнь», 1956, № 9, стр. 58—59, портр.

Вайнштейн Э. Е. Людвиг Больцман — физик-материалист.— «Природа», 1945, № 2, стр. 79—85.

Обе статьи знакомят с важнейшими проблемами физики (в области атомистики, термодинамики и др.), получившими в трудах Больцмана по существу материалистическое освещение.

Давыдов Б. И. Людвиг Больцман. (1844—1906).— В кн.: Больцман. Л. Лекции по теории газов. М., Гостехиздат, 1956, стр. 9—17.

Давыдов Б. И. Великий физик. (К 50-летию со дня смерти Людвига Больцмана).— «Успехи физ. наук», 1957, т. 61, вып. 1, стр. 17—22.

Боголюбов Н. Н. и Саночкин Ю. В. Людвиг Больцман.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 61, вып. 1, стр. 7—15.

Фламм Л. Памяти Людвига Больцмана.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 61, вып. 1, стр. 3—5.

Доклады, прочитанные на заседании Отделения физико-математических наук Академии наук СССР, посвященном 50-летию со дня смерти Людвига Больцмана.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2., стр. 103—109.

ВИЛЬГЕЛЬМ КОНРАД РЕНТГЕН

(1845—1923)

Выдающийся немецкий физик-экспериментатор Вильгельм Конрад Рентген родился 27 марта 1845 года в г. Ленепе, на северо-западе Германии. В 1866 году он окончил высшее инженерное училище — Политехникум в Цюрихе. Уже в студенческие годы Рентген серьезно интересовался физикой, что позволило ему в 1868 году защитить диссертацию на получение степени доктора философии. В 1872 году он был приглашен в Страсбургский университет в качестве ассистента известного физика Августа Кундта (1839—1894), создавшего одну из лучших в Европе школ экспериментальной физики. Получив в 1875 году звание профессора, Рентген некоторое время преподавал физику в Сельскохозяйственной академии, а в дальнейшем был профессором ряда германских университетов — Страсбургского (с 1876 г.), Гисенского (с 1879 г.), Вюрцбургского (с 1888 г.) и, наконец (с 1900 по 1919 гг.),— Мюнхенского. В Мюнхене Рентген оставался до конца своей жизни. С 1919 года, передав кафедру в университете Вильгельму Вину, он руководил Метрономическим институтом (при Физическом институте университета).

Умер Рентген 10 февраля 1923 года.

Первые научные работы Рентгена были посвящены исследованию основных свойств жидкости — сжимаемости, внутреннего трения, поверхностного натяжения. В результате этих исследований (1883—1892) он сделал новые важные выводы о молекулярной структуре воды. С самого начала научной деятельности Рентгена появился его блестящий экспериментаторский талант. С помощью простых опытов он сумел обнаружить и измерить поглощение инфракрасных лучей водяным паром. До опытов Рентгена о существовании этого явления долго и бесплодно спорили физики Тиндаль и Магнус.

Важной и большой областью научной деятельности Рентгена были исследования электрических явлений в диэлектриках (главным образом в кристаллах). Изучая явления пиро- и пьезоэлектричества, он еще в

80-е годы открыл явление так называемого «ложного пироэлектричества». Оно заключается в том, что при неравномерном нагревании всех пьезоэлектрических кристаллов, в частности, кварца на концах кристалла возникают противоположные электрические заряды. Этот эффект является по существу пьезоэлектрическим (что было показано Рентгеном позднее, в 1913—1914 гг.), возникающим за счет появления внутренних напряжений в кристалле при неравномерном его нагревании. Однако Рентген ошибочно полагал, что все пироэлектрические эффекты сводятся к пьезоэлектричеству.

Исследуя поведение диэлектриков в электрическом поле, Рентген в 1890 году обнаружил, что при вращении в электрическом поле диэлектрика вокруг него возникает магнитное поле. Так как диэлектрик в электрическом поле поляризуется, то опыт Рентгена наглядно показал, что магнитное поле создается движущимися зарядами. Это открытие Рентгена явилось одним из аргументов в пользу представлений об электрическом токе как о потоке заряженных частиц и имело большое значение для дальнейшего развития электродинамики. Правда, самому Рентгену удалось получить лишь качественные результаты, но в 1901—1904 гг. русский физик А. А. Эйхенвальд, повторив опыт Рентгена, сумел получить точные количественные характеристики и доказать тождественность магнитных полей гальванического тока и движущегося заряженного тела [1].

Рентген занимался также исследованием взаимодействия оптических и электрических явлений; он исследовал, в частности, явление двойного лучепреломления в кристаллах и некоторых жидкостях, помещенных в электрическом поле.

Однако основной и бессмертной научной заслугой Рентгена является открытие им лучей, названных впоследствии его именем. Это знаменитое открытие Рентген сделал 8 ноября 1895 года во время опытов с катодными лучами. В первых же опытах Рентген заметил то, чего не замечали в течение почти сорока лет со времени открытия катодных лучей (в 1859 г.): слабое свечение экрана, несмотря на то, что помещенная перед ним Круксова трубка была закрыта черной бумагой, непроницаемой для всех известных тогда лучей. Вслед за этим Рентген в трех научных сообщениях — «О новом роде лучей», «Новый род лучей» (Вюрцбург, 1895 и 1896 гг.) и «Дальнейшие наблюдения над свойствами Х-лучей» [2] (Берлин, 1897 г.) подробно описал свойства открытого им излучения.

Пользуясь простейшими экспериментальными средствами, Рентген открыл фотографическое действие рентгеновских лучей (ему принадлежат первые рентгеновские снимки), обнаружил ионизирующее действие этих лучей на воздух и способность их вызывать флуоресценцию (характерное свечение в видимой области спектра некоторых веществ при их освещении). Таким образом, Рентген открыл все три явления, характеризующие присутствие рентгеновских лучей. Остроумными опытами он

---

[1] Мысль об этом высказывал еще Максвелл.

[2] Это название рентгеновских лучей (Х-лучи), принадлежащее Рентгену, в настоящее время сохранилось в Англии.



Вильгельм Конрад Рентген

показал, что эти лучи не испытывают правильного отражения и рассеиваются даже от самых гладких поверхностей. Уже тогда Рентген пытался, хотя и безуспешно (из-за слабости источника излучения), обнаружить зависимость рассеяния и поглощения рентгеновских лучей в кристаллах от направления падения этих лучей на плоскости, в которых располагаются в кристаллах атомы. Иными словами, Рентген пытался обнаружить дифракцию и интерференцию рентгеновских лучей. Открытие этих явлений было сделано в 1912 году немецким физиком М. Лауэ, который располагал уже более мощной рентгеновской трубкой — источником рентгеновских лучей.

Рентген открыл также важнейшее свойство рентгеновских лучей — зависимость их поглощения исключительно от плотности вещества, на которое они падают. Он показал, что проникающая способность (жесткость) этих лучей растет с увеличением скорости электронов катодных лучей. Ему же принадлежит широко применяемая теперь конструкция рентгеновской трубки — с вогнутым катодом и наклонным платиновым антикатодом.

По аналогии с механической упругой теорией света, согласно которой луч света представляет собою распространяющиеся поперечные колебания особой среды — мирового эфира, Рентген высказал предположение, что открытые им лучи представляют собою продольные колебания эфира. Хотя это было и ошибочным представлением, однако в основе его лежала верная мысль о том, что рентгеновские лучи по своей природе родственны обычному свету.

За открытие рентгеновских лучей Рентгену в 1901 году была присуждена Нобелевская премия [1] по физике. Рентген был первым лауреатом этой высшей международной научной награды.

Открытие Рентгена произвело огромное впечатление на ученых всего мира и вызвало множество новых исследований. Одно за другим появлялись сообщения об открытиях «новых» излучений. Одно из них действительно оказалось замечательным — это было сообщение об открытии в 1896 году Анри Беккерелем урановых лучей (радиоактивности). После первых работ Рентгена в течение целых семи лет в печати не появилось ни одной работы, которая проливала бы новый свет на природу рентгеновских лучей. Лишь в первой четверти XX века были достигнуты крупные успехи в этой области: установлена электромагнитная природа рентгеновских лучей, открыты их характеристические спектры, открыты (в опытах с кристаллами) поляризация, дифракция и интерференция рентгеновских лучей, изучены законы их отражения и преломления, измерена (1923 г., Комптон) длина волны, оказавшаяся в десятки тысяч раз короче волн видимого света.

---

[1] Нобелевская премия за выдающиеся достижения в области науки, искусства, а также за «содействие братству народов, отмене или сокращению вооруженных сил и организации и созыву конгрессов мира», была учреждена в соответствии с завещанием шведского инженера Альфреда Нобеля (1833—1896), изобретателя динамита, оставившего после себя огромные капиталы. Премия представляет собою проценты с этих капиталов.

В результате всех этих работ, а также работ многих крупных физиков последующих лет рентгеновские лучи получили в настоящее время самое широкое применение в науке и технике. Исключительно велика их роль в медицине, где они стали применяться по инициативе самого Рентгена уже вскоре после их открытия.

Открытие Рентгена сыграло величайшую роль в развитии физики. Оно позволило начать глубокое изучение строения атома и тем самым способствовало развитию электронной теории материи, а позднее — возникновению ядерной физики и физики элементарных частиц.

В процессе долгой, почти пятидесятилетней научной деятельности Рентген создал свою физическую школу. Его учениками были многие видные физики, среди них — А. Ф. Иоффе, ныне крупный советский физик. Совместно с А. Ф. Иоффе Рентген провел большие исследования по изучению электропроводимости изолирующих кристаллов в зависимости от их освещения. Знавший Рентгена лично в течение многих лет академик А. Ф. Иоффе впоследствии писал о нем:

«Блестящий экспериментаторский талант, ясная и простая постановка опыта, всесторонний и тонкий анализ возможных ошибок, наивысшая точность и достоверность полученных результатов,— вот черты, общие всем его 25 работам, сделавшие их классическими» [1].

ТРУДЫ В. К. РЕНТГЕНА

Рентген В. К. О новом роде лучей. Пер. с нем. Под ред. и с прим. акад. А. Ф. Иоффе. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933. 115 стр., портр. (Классики естествознания).

Перевод трех последовательных сообщений В. Рентгена, сделанных им в Вюрцбургском физико-медицинском обществе в 1895—1897 гг. В конце книги приводится перечень работ В. Рентгена, состоящий из пятидесяти восьми названий, расположенных в хронологическом порядке, от 1870 до 1921 гг.

Первые русские переводы сообщений Рентгена появились в Москве, Киеве и Казани в 1896 г.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ОТКРЫТИИ В. К. РЕНТГЕНА

Рентген Вильгельм-Конрад.— БСЭ, 2-е изд., т. 36, 1955, стр. 366—367, портр.

Лазарев П. П. Вильгельм-Конрад Рентген.— «Природа», 1915, апр. стлб. 585—588.

Иоффе А. Ф. Вильгельм-Конрад Рентген.— «Успехи физ. наук», 1924, т. 4, вып. 1, стр. 1—10.

Краткий очерк жизни и творчества, написанный по личным воспоминаниям автора.

Иоффе А. Ф. Вильгельм-Конрад Рентген.— В кн.: Рентген В.-К. О новом роде лучей. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 5—24.

Несколько переработанный автором предыдущий очерк.

---

[1] «Успехи физ. наук», 1924, т. 4, вып. 1, стр. 2.

Иоффе А. Ф. Вильгельм-Конрад Рентген.— «Природа», 1938, № 2, стр. 107—112, портр.

К 15-летию со дня смерти.

Файнбойм И. Б. Памяти Рентгена. (15 лет со дня смерти).— «Физика в школе». 1938, № 4, стр. 8—10, портр.

Вильгельм-Конрад Рентген. (К пятнадцатилетию со дня смерти).— «Журнал техн. физики», 1938, вып. 4, стр. 373.

Диллон Я. Г. Вильгельм-Конрад Рентген.— «Клиническая медицина», 1938, № 11, стр. 1460—1462, портр.

Гречишкин С. В. В.-К. Рентген. (К 15-летию со дня смерти).— «Вестник рентгенологии и радиологии», 1938, т. 21, вып. 1, стр. 36—37.

В декабре 1945 года советская научная общественность отметила 50-летие открытия рентгеновских лучей. Материалы заседаний сессии Отделения физико-математических наук Академии наук СССР, посвященной этому юбилею, напечатаны в журнале «Известия Академии наук СССР. Серия физическая», 1946, № 4, стр. 341—396.

Среди других материалов, помещенных в этом номере, широкий интерес представляет доклад:

Иоффе А. Ф. Историческое значение открытия Рентгена — «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1946, № 4, стр. 433—349.

Этой же теме посвящены статьи:

Гречишкин С. В. История открытия рентгеновских лучей. (Предшественники Рентгена).— «Природа», 1947. № 8, стр. 69—72.

Кравец Т. П. К истории открытия рентгеновских лучей.— «Вестник Акад. наук СССР», 1946, № 3, стр. 47—54.

В сжатом очерке истории великого открытия большое внимание уделено работам по дальнейшему изучению действия рентгеновых лучей.

Рейнберг С. А. Жизнь Вильгельма-Конрада Рентгена и история открытия рентгеновых лучей.— В кн.: Очерки развития медицинской рентгенологии. 50 лет рентгеновых лучей в медицине. М., Медгиз, 1948, стр. 10—25.

Иоффе А. Ф. Воспоминания о Вильгельме-Конраде Рентгене.—В кн.: Очерки развития медицинской рентгенологии. 50 лет рентгеновых лучей в медицине. М., Медгиз, 1948, стр. 29—35.

Яковенко Е. И. Чествование Вильгельма-Конрада Рентгена в Вюрцбурге.— В кн.: Очерки развития медицинской рентгенологии. 50 лет рентгеновых лучей в медицине. М., Медгиз, 1948, стр. 26—28.

Отрывок из воспоминаний автора о чествовании Рентгена в Вюрцбурге в связи с открытием рентгеновых лучей.

* * *

Гариг Г. Э. «Юбилей» Рентгена в «Третьей империи». — «Архив истории науки и техники». Вып. 8. М.—Л., Акад. наук СССР, 1936, стр. 301—309.

В статье рассказывается о том, как германские фашисты пытались принизить роль Рентгена в открытии рентгеновских лучей.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 264, 354, 370—374 и др. (см. именной указатель).

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 379—381.

Лауэ М. История физики, стр. 154—155, 184—185 и др. (см. именной указатель).



НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ УМОВ

(1846—1915)

Николай Алексеевич Умов родился в г. Симбирске (ныне Ульяновск) 4 февраля 1846 года. Окончив с золотой медалью гимназию в Москве, он в 1863 году поступил на физико-математический факультет Московского университета. Здесь Умов встретился с такими выдающимися преподавателями и учеными, как В. Я. Цингер, Ф. А. Бредихин, Ф. А. Слудский; здесь же он слушал замечательные лекции А. Г. Столетова, тогда начинавшего свою педагогическую деятельность в Московском университете.

В 1867 году Умов окончил университет и был оставлен при нем для подготовки к званию профессора. Одновременно он начал преподавать физику и математику во 2-й Московской женской гимназии, на Лубянских женских курсах, в женской народной школе.

После защиты магистерской диссертации в 1871 году Умов был приглашен в Новороссийский университет (в Одессе), где стал читать лекции по теоретической физике и где с первых же лет проявил себя выдающимся педагогом. Курс его лекций, охватывавший все известные в то время области теоретической физики, пользовался большим успехом у студентов.

В 1893 году Н. А. Умов возвратился в Московский университет. В Москве, помимо чтения лекций, он много сил отдавал организации экспериментальных исследований по физике. Умов сыграл по существу главную роль в деле создания Физического института при университете (1903 г.), тем самым завершив дело, начатое А. Г. Столетовым.

Научную деятельность Н. А. Умов начал в конце 60-х годов и уже в первых своих работах предстал как талантливый физик-теоретик. В 1870 году на заседании Московского математического общества Умов доложил свою работу «Законы колебания в неограниченной среде постоянной упругости», в которой дал в общем виде математическую теорию продольных и поперечных колебаний в среде. Эта первая научная рабо-



Николай Алексеевич Умов

та Умова получила высокую оценку А. Г. Столетова, Н. Е. Жуковского и Ф. А. Бредихина.

Во второй своей работе — «Теория термомеханических явлений в твердых упругих телах», представленной в качестве магистерской диссертации, Умов впервые попытался на основании закона сохранения и превращения энергии построить общую, единую теорию явлений теплопроводности и упругости в твердых телах. Эта работа Умова до сих пор не потеряла своей научной ценности.

Исследования Умова по теории колебаний и особенно по теории теплопроводности и упругости, где он впервые ввел понятие «теплового тока» и исследовал с его помощью распространение тепловой энергии в теле, привели Умова к его основному научному труду — к созданию общего учения о движении и распределении энергии любого вида.

Н. А. Умов был убежденным защитником материалистической идеи близкодействия в физике. Он считал, что тела взаимодействуют лишь через посредство промежуточной материальной среды (в понятие среды Умов включал и различные силовые поля — электрическое, магнитное, поле тяжести). Ряд теоретических работ Умова, вышедших в эти годы, посвящен вопросу о промежуточной среде, о взаимодействии тел, находящихся на конечных расстояниях друг от друга. Взаимодействие таких тел Умов представлял себе как обмен той или иной формой энергии не непосредственно между телами, а между этими телами и промежуточной средой. Это привело его к выводу, что путем исследования различных превращений и передачи энергии между частицами тела и среды можно определить и вызываемые этим обменом движения самих частиц взаимодействующих тел и среды и таким образом изучать любые явления, которые с точки зрения распространенного тогда механистического направления в физике вызываются механическими движениями материи.

Свое учение о движении и распространении энергии Н. А. Умов наиболее полно изложил в докторской диссертации «Уравнения движения энергии в телах», которую защитил в Московском университете в 1874 году. Во введении он писал: «Законы перехода энергии с одного элемента среды на другой определялись до сих пор только для частных форм движения. Задача настоящего труда заключается в установлении на общих началах учения о движении энергии в средах. Раскрытие общей связи между распределением и движением энергии в средах и перемещениями их частиц, независимо от частных форм движений, должно дать возможность из известных законов движения и распределения энергии в теле выводить заключение о роде движений его частиц»[1].

В своей теории Умов впервые ввел понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии, о ее плотности в данной точке среды. Он защищал материалистическую мысль о том, что передача энергии, перенос ее в пространстве совершается от точки к точке среды и всегда за некоторый определенный промежуток времени, а не мгновенно, как полагали сторонники идеи дальнодействия.

---

[1] Умов Н. А. Избранные сочинения. М., Гостехиздат, 1950, стр. 150.

Выведенное им в наиболее общем виде уравнение движения энергии по существу выражало в дифференциальной форме закон сохранения энергии. Исходя из этого основного уравнения теории, он вывел уравнения движения энергии для ряда частных случаев — для твердых тел постоянной упругости, для жидких тел. Особенно большое внимание уделялось им проблеме распространения энергии в виде волн, прежде всего движения электромагнитной энергии.

В наиболее общем виде Н. А. Умов доказал теорему о связи между величиной энергии волн, скоростью движения энергии и величиной возникающих в результате этого упругих сил, действующих на площадку, через которую протекает данный поток энергии. В частном случае электромагнитной энергии эти упругие силы проявляются в виде светового давления. Независимо от Максвелла Н. А. Умов доказал также, что плотность энергии в любой точке поля прямо пропорциональна квадрату напряженности поля в той же точке.

Через 10 лет, в 1884 году, английский физик Дж. Г. Пойнтинг (1852—1914) независимо от Умова описал движение электромагнитной энергии, введя особую векторную величину, по своей абсолютной величине равную плотности энергии в данной точке среды. Этот вектор называют в настоящее время вектором Умова—Пойнтинга.

В дополнении к диссертации 1874 года Умов ввел понятие о направлении потока энергии в данной точке. Ему же принадлежит введение общепринятого в настоящее время представления о луче как о направлении движения энергии.

Диссертация Умова встречена была весьма холодно. Значение ее впервые стало раскрываться после появления более доступных для понимания работ Пойнтинга, результаты которых вытекали как частный случай из общей теории Умова.

В современной физике идеи и теория Умова о движении энергии получили полное признание. Они нашли широкое применение в теории поля, в электродинамике, оптике, акустике, гидродинамике, радиофизике.

В Московском университете Умов также провел ряд важных теоретических исследований. Главное из них было посвящено земному магнетизму. Теорию земного магнетизма впервые разработал Гаусс. Умов установил физический смысл многих сложнейших формул Гаусса и на их основании предложил способ, позволяющий определять изменения земного магнетизма с течением времени (так называемые вековые, т. е. непериодические изменения).

Помимо теоретических работ, Умову принадлежит ряд исследований в области экспериментальной физики. Наиболее выдающимися из них являются его работы (1905—1912 гг.) по изучению поляризационных свойств света, рассеянного в мутных средах или отраженного от шероховатых поверхностей (диффузное отражение). До работ Умова было распространено мнение, что плоско поляризованный луч света в результате отражения от матовой поверхности (если только она не черная) полностью деполяризуется. Умов в 1905 году открыл избирательный (по дли-

нам волн) характер такой деполяризации и установил связь ее с поглощением света поверхностью вещества.

На основании открытия связи между поляризационными свойствами света при рассеивании и его поглощением Н. А. Умов создал новый оригинальный спектро-полярископический метод исследования поглощения света телами, а также изобрел прибор для точного анализа цвета краски на поверхности тел.

Научная деятельность Умова не ограничивалась только перечисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Она отличалась исключительной разносторонностью. Новейшие открытия и проблемы физики — природа катодных и рентгеновских лучей, токи в разреженных газах, явление радиоактивности и т. д. — все это находило отражение в работах Умова.

Одним из первых Умов сумел глубоко понять и оценить значение теории относительности. Если в годы разработки им учения о движении энергии Умов был механистическим материалистом, то с дальнейшим развитием физики он пришел к выводу об ограниченности механистической физики. В своей яркой речи «Значение Декарта в развитии физических наук» (1896 г.) Умов выступил с глубокой критикой механистических взглядов. В своих математических работах он развивал идеи специальной теории относительности. Опираясь на геометрию Лобачевского, Умов развивал идею связи геометрии и физики и утверждал, что свойства пространства определяются свойствами материи, находящейся в нем.

Большое значение для утверждения и распределения новых физических идей имели научно-популярные статьи и блестящие публичные выступления Н. А. Умова по вопросам теории относительности и теории квантов.

В то время как многие физики пришли к выводу о полной относительности всех физических явлений, о принципиальной невозможности поэтому познать истинные, абсолютные законы природы, Умов в своих статьях и выступлениях проводил глубоко материалистическую мысль о возможности познания окружающего мира. «...Миры природы, — писал он, — суть миры относительностей, находящихся в такой взаимной гармонии, что из них мы почерпаем представления об абсолютных законах природы»[1].

Н. А. Умов был замечательным пропагандистом науки, популяризатором естественнонаучных знаний. Он участвовал в организации различных научных обществ, в течение 17 лет возглавлял Московское общество испытателей природы. Как выдающийся педагог Н. А. Умов в 1902 году был избран председателем Педагогического общества при Московском университете. Деятельность Умова в этом обществе имела большое значение для постановки преподавания физики в средних и высших учебных заведениях.

---

[1] Умов Н. А. Собрание сочинений. Т. 3. М., 1916, стр. 412.

В 1911 году Умов вместе с другими прогрессивно настроенными профессорами покинул Московский университет, работе в котором он в течение 18 лет отдавал все свои силы. Причиной этого тяжелого для ученого шага были реакционные действия нового министра просвещения Кассо, направленные против традиционных прав университета.

Умер Николай Алексеевич Умов 15 января 1915 года в Москве.

ТРУДЫ Н. А. УМОВА

Умов Н. А. Избранные сочинения. Под ред. чл.-корр. Акад. наук СССР проф. А. С. Предводителева. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 554 стр.; 10 л. илл. и карт. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

Содержание: Законы колебаний в неограниченной среде постоянной упругости.— Теория термомеханических явлений в твердых упругих телах. Диссертация на соискание ученой степени магистра физико-математических наук.— Уравнения движения энергии в телах. Докторская диссертация.—Прибавление к статье «Уравнения движения энергии в телах».— Опыт исследования магнитных образов земного магнетизма.— Построение геометрического образа потенциала Гаусса как прием изыскания законов земного магнетизма.— Дополнение закона гидродиффузии и новые диффузиометры.— Хроматическая деполяризация при рассеивании света.— Спектрально-поляризационный метод исследования поглощения света и природы красок.— О стационарном движении электричества на проводящих поверхностях произвольного вида.— Геометрическое значение интегралов Френеля.— Общее выражение термодинамического потенциала.— Единообразный вывод преобразований, совместных с принципом относительности.— Условия инвариантности уравнения волны.— Возможный смысл теории квант.

Московским обществом испытателей природы совместно с Обществом содействия успехам опытных наук и их практических применений имени Х. С. Леденцова еще при жизни Н. А. Умова было предпринято издание Собрания его сочинений предположительно в семи томах.

Вышел только следующий том:

Умов Н. А. Собрание сочинений, издаваемое имп. Московским обществом испытателей природы и Обществом содействия успехам опытных наук и их практических применений имени Х. С. Леденцова. Под ред. и с примеч. А. И. Бачинского. Т. 3. Речи и статьи общего содержания. М., 1916. XVI, 666 стр. с илл.; 11 л. илл. и портр.

В том вошло 57 работ Н. А. Умова, посвященных проблемам естествознания, развитию физических наук, вопросам среднего и высшего образования и ряду выдающихся естествоиспытателей — отечественных и зарубежных: Максвеллу, Томсону (Кельвину), И. М. Сеченову, К. А. Тимирязеву, педагогам — Ф. А. Слудскому, Я. И. Вейнбергу.

Умов Н. А. Курс физики. Т. 1—2. М., 1901—1902.

Т. 1. Механика. — Молекулярная физика. — Теплота. 1901. 410 стр.

Т. 2. Звук. — Свет. — Электричество. — Магнетизм. 1902. 441 стр.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Н. А. УМОВА

Умов Николай Алексеевич. (1846—1915). — БСЭ, 2-е изд., т. 44, 1956, стр. 228, портр.

Н. А. Умов. Автобиографический очерк. — В кн.: Умов Н. А. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 9—28.

Бачинский А. И. Николай Алексеевич Умов. Биографический очерк и перечень печатных трудов с указанием времени и места их появления. М., 1915. 40 стр. с илл. и портр.; 4 л. илл. и портр. (О-во содействия успехам опытных наук и их практич. применений им. Х. С. Леденцова).

Бачинский А. И. Очерк жизни и трудов Николая Алексеевича Умова. М., 1916. 84 стр.

Второй очерк полнее и предполагает несколько более подготовленного читателя.

Хвольсон О. Д. Н. А. Умов. — «Вопросы физики», 1915, вып. 2, стр. 37—49.

Обзор научной, педагогической и общественной деятельности.

Де-Метц Г. Г. Памяти Н. А. Умова. — «Физическое обозрение», 1915, т. 16, № 3, стр. 121—146.

Воспоминания о научной и педагогической деятельности Н. А. Умова. Последние дни Н. А. Умова.

Каган В. Ф. Памяти Николая Алексеевича Умова. — «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1915, № 628—629, стр. 75—99.

Речь, произнесенная в заседании Новороссийского общества естествоиспытателей 20 февраля (5 марта) 1915 года.

Мечников И. И. Памяти Н. А. Умова. — В кн.: Страницы воспоминаний. М., Акад. наук СССР, 1946, стр. 67—69.

Воспоминания о встречах с Н. А. Умовым, с которым И. И. Мечников находился в очень близких, дружественных отношениях.

* *
*

18 апреля (1 мая) 1915 года состоялось чрезвычайное соединенное заседание московских научных обществ и учреждений, посвященное памяти Н. А. Умова. Материалы этого заседания опубликованы в книге:

Протокол Чрезвычайного соединенного заседания московских ученых обществ и учреждений в память Н. А. Умова. М., 1916. 76 стр. с илл. и портр.; 3 л. илл. и портр.

Содержание: М. А. Мензбир. Н. А. Умов как руководитель ученого общества.— Э. Лейст. Труды Н. А. Умова по земному магнетизму.— С. А. Федоров. Значение и труды Н. А. Умова в Обществе содействия успехам опытных наук и их практических применений (имени Х. С. Леденцова).— Н. Е. Жуковский. Николай Алексеевич Умов как математик.— А. А. Эйхенвальд. О научных работах Н. А. Умова по физике.— А. А. Мануйлов. Н. А. Умов как общественный деятель.— А. В. Цингер. Н. А. Умов как учитель.— А. И. Бачинский. Характеристика Н. А. Умова как ученого, как мыслителя и как человека.

* *
*

Лазарев П. П. Николай Алексеевич Умов, президент Московского общества испытателей природы (1846—1915). М., 1940. 40 стр.; 2 л. портр. (Моск. о-во испытателей природы, 1805—1940. Серия историческая, № 17).

Биографический очерк, написанный одним из учеников Н. А. Умова. Н. А. Умов характеризуется в очерке как крупный ученый и общественный деятель, принимавший

близкое участие в работе Московского общества испытателей природы; как университетский преподаватель, оставивший по себе среди своих слушателей и учеников живую и благодарную память; как «стойкий, твердый человек, человек передовых убеждений, никогда не поступавший против велений своей совести».

Эта же биография, в отдельных местах редакционно несколько исправленная, вышла под названием:

Лазарев П. П. Н. А. Умов. (Биография). — В кн.: Лазарев П. П. Очерки истории русской науки. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 191—231.

Шпольский Э. В. Николай Алексеевич Умов. — «Успехи физ. наук», 1947, т. 31, вып. 1, стр. 129—146.

Предводителев А. С. Николай Алексеевич Умов. (1846—1915). — В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 143—152, портр.

Предводителев А. С. и **Максимов А. С.** Н. А. Умов. — В кн.: Очерки по истории физики в России. Пособие для студентов и учителей. Под ред. А. К. Тимирязева. М., Учпедгиз, 1949, стр. 130—145, портр.

Предводителев А. С. Николай Алексеевич Умов. 1846—1915. — В кн.: Умов Н. А. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1950, стр. 513—529.

Предводителев А. С. Николай Алексеевич Умов. 1846—1915. Биографический очерк. М., Моск. гос. ун-т, 1950. 55 стр. с портр. (Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч. б-ка им. А. М. Горького. Замечат. ученые Моск. ун-та. Вып. 9).

Последние четыре очерка, автором которых является А. С. Предводителев — один из учеников Н. А. Умова, во многом, разумеется, повторяют друг друга. Наиболее доступным, написанным для самых широких кругов читателей, является очерк в книге «Люди русской науки». Несколько более труден последний очерк, вышедший в серии «Замечательные ученые Московского университета»

* *
*

Научно-педагогическая деятельность Н. А. Умова освещена в статьях:

Соколов И. И. Проф. Н. А. Умов как руководитель учителей физики.— «Физика в школе», 1946, № 1, стлб. 65—90, портр.

Роль Н. А. Умова в разработке программ, методики преподавания и организации практических занятий для подготовки преподавателей физики в средних учебных заведениях России.— Университетские лекции Н. А. Умова как образец методической обработки. Публичные речи Н. А. Умова и их значение для преподавателей.

Агабабов Х. А. Николай Алексеевич Умов. — «Вестник высшей школы», 1953, № 5, стр. 40—46.

Из серии статей: «Выдающиеся педагоги отечественной высшей школы»

Н. А. Умов был не только выдающимся теоретиком, но и первоклассным экспериментатором. К наиболее замечательным экспериментальным исследованиям Умова относятся его оптические работы.

Об этом говорится в статье:

Гуло Д. Д. Работы Н. А. Умова по оптике. — «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1956, т. 10, стр. 269—298.

Роль Н. А. Умова в развитии материалистического направления в физике освещена в следующих работах:

Компанеец А. И. Н. А. Умов — основоположник учения о движении энергии. — «Физика в школе», 1954, № 4, стр. 20—25.

Компанеец А. И. Борьба Н. А. Умова за материализм в физике. М., Акад. наук СССР, 1954. 128 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Ин-т философии).

Главы книги: 1. Жизнь и деятельность Н. А. Умова. 2. Философские основы естественнонаучных воззрений Н. А. Умова. 3. Учение Н. А. Умова о движении энергии. 4. Н. А. Умов и новейшие открытия в физике конца XIX — начала XX вв.

Общее значение научной деятельности Н. А. Умова в истории русской и мировой физики охарактеризовано в книге:

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2. От Менделеева до открытия квант. (1870—1900 гг.). М., Учпедгиз, 1956, стр. 408—417.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Гаухман Р. П. Библиография печатных трудов Н. А. Умова и критико-биографическая литература о нем.—В кн.: Николай Алексеевич Умов. 1846—1915. М., Моск. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч. б-ка им. М. А. Горького, 1950, стр. 34—53.

АНРИ АНТУАН БЕККЕРЕЛЬ

(1852—1908)

С именем французского ученого Анри Антуана Беккереля связано одно из наиболее крупных событий в истории физики — открытие радиоактивности. Развитие современной атомной и ядерной физики, атомной энергетики, новые, исключительно высокой чувствительности методы исследования, в частности уже вошедший во многие области науки, техники, сельского хозяйства, медицины метод «меченых атомов», — все это уходит своими корнями в открытие Беккереля.

Анри Антуан Беккерель родился в Париже 15 декабря 1852 года. Он происходил из семьи, можно сказать, потомственных физиков. Известными физиками были дед и отец ученого, видным физиком является его сын. Двадцати двух лет Анри Беккерель окончил Политехническую школу в Париже, а еще через три года — Школу мостов и шоссейных дорог, служившую продолжением первой, но с более узкой специализацией, и получил звание инженера. Однако наиболее глубокие интересы Беккереля лежали в области физики. Уже через год после окончания учения он занял должность помощника натуралиста в Музее естественной истории. В дальнейшем Беккерель почти 30 лет преподавал физику — сначала замещал отца на кафедре прикладной физики в Училище искусств и ремесел, затем, с 1892 года, занимал должность профессора практической физики в Музее естественной истории, а с 1895 года и до конца своей жизни был профессором физики в Политехнической школе.

В 70-е годы Беккерель приступил к самостоятельным научным исследованиям в области физической оптики. Он начал с изучения магнитного вращения плоскости поляризации светового луча. Это явление, открытое Фарадеем, заключается в том, что при прохождении поляризованного луча света через некоторые вещества, помещенные в сильное магнитное поле, силовые линии которого направлены вдоль луча, плоскость поляризации луча поворачивается. Неоднократно возвращаясь к этим исследованиям на протяжении более чем двадцати лет (1876—1898), Беккерель ис-

следовал магнитную вращательную способность газов, воздуха и раскаленных паров некоторых веществ. В этот же период он исследовал поглощение света в кристаллах, за что в 1888 году получил ученую степень доктора, а также занимался изучением аномальной дисперсии света при прохождении его через раскаленные пары (1898 г.).

В начале 80-х годов Беккерель начал исследования люминесценции — явления свечения некоторых веществ в результате их облучения. В лаборатории своего отца — крупного специалиста в этой области — Беккерель в 1882—1892 гг. изучил для множества веществ явление фосфоресценции — один из видов люминесценции[1]. Дальнейшие работы в этой области самым неожиданным образом привели Беккереля к открытию радиоактивности.

В 1895 году из Германии пришло известие об открытии немецким физиком Рентгеном удивительных Х-лучей, в настоящее время широко известных под названием лучей Рентгена. Открытие Рентгена повлекло за собою целый ряд исследований, в которых физики пытались установить природу этого таинственного излучения.

Рентгеновские лучи были открыты впервые в катодной трубке, которая и в настоящее время используется в качестве их источника. В первых катодных трубках не было металлического антикатода, и поток электронов, испускавшихся раскаленным катодом трубки, ударялся о противоположную стеклянную стенку трубки, вызывая при этом, кроме появления рентгеновского излучения, еще и сильную люминесценцию стекла. Это навело известного французского математика Анри Пуанкаре на мысль, что люминесценция, независимо от ее происхождения, возможно, всегда сопровождается испусканием рентгеновских лучей. Многие ученые в связи с этим тщетно пытались обнаружить рентгеновское излучение некоторых люминесцирующих веществ (сернистого цинка, сернистого кальция). В 1896 году подобными же опытами занялся Беккерель, взяв для этих исследований соли урана, обладающие сильной флуоресцирующей способностью. Он помещал на фотографическую пластинку, обернутую в черную фотографическую бумагу, кусочек такой соли и освещал его в течение некоторого времени солнечным светом, а затем проявлял пластинку, пытаясь обнаружить на ней следы рентгеновских лучей (все другие известные к тому времени лучи заведомо не могли проникнуть через черную фотографическую бумагу). На проявленных пластинках Беккерель действительно обнаружил отпечатки кусков солей урана. Однако в процессе этих опытов он открыл вскоре и совершенно новое явление, которое никак нельзя было назвать излучением рентгеновских лучей. Проявив пластинку, на которой до того лежал кусок соли урана, не подвергавшийся еще (едва ли не по случаю пасмурной погоды) освещению, необходимому для возбуждения в нем флуоресценции, Беккерель также обнаружил на пластинке отпечаток этого куска, иными словами — следы какого-то излуче-

---

[1] Различают два вида люминесценции: флуоресценцию — кратковременное свечение, практически прекращающееся с прекращением облучения, и фосфоресценцию — свечение, сохраняющееся некоторое заметное время и после прекращения облучения люминесцирующего вещества



Анри Антуан Беккерель

ния. Повторив подобные опыты, причем были испытаны соли урана, в течение нескольких лет перед тем находившиеся в полной темноте, а также различные нефлуоресцирующие соли урана, Беккерель открыл самопроизвольное излучение соединений урана. Он установил, что новые, урановые (или беккерелевы) лучи, как и рентгеновские, кроме действия на фотографическую пластинку, ионизируют воздух и другие газы, не отражаются и не преломляются[1], что они проходят через тонкие металлические пластинки, но в отличие от лучей Рентгена обладают еще большей проникающей способностью. Беккерель открыл также, что интенсивность урановых лучей не уменьшается со временем и не зависит от освещения и температуры излучающего вещества. Все это доказывало, что открытые им лучи представляют собою совершенно новое явление.

Открытие Беккереля на большинство физиков вначале не произвело заметного впечатления — отчасти, возможно, потому, что уж слишком много «новых» излучений появлялось после знаменитого открытия Рентгена. Однако оно сразу же привлекло к себе самое пристальное внимание выдающегося физика и химика Марии Склодовской-Кюри, которая в 1897 году вначале одна, а затем со своим мужем Пьером Кюри приступила к подробному исследованию нового явления, названного ею радиоактивностью. В результате этих работ уже в 1897 году было установлено, что радиоактивное излучение является свойством самих атомов урана. В 1898 году П. и М. Кюри обнаружили радиоактивность тория и открыли совершенно новые радиоактивные химические элементы — полоний и наиболее радиоактивный из всех известных элементов — радий. В эти же годы исследованием явления радиоактивности занялся Резерфорд.

Опыты с радием привели П. и М. Кюри и независимо от них Резерфорда и его сотрудника Содди к открытию в 1900 году двух компонентов радиоактивного излучения, которые были названы Резерфордом альфа- и и бета-лучами. Относительно последних Пьер Кюри высказал мнение, что они представляют собою поток мельчайших отрицательно заряженных частиц, подобных частицам катодных лучей. В том же 1900 году Беккерель, наблюдая отклонение бета-лучей под влиянием электрического и магнитного полей, впервые определил для бета-частиц величину отношения заряда к массе и скорость этих частиц. Результаты, полученные Беккерелем, оказались чрезвычайно близкими к результатам, полученным ранее тем же путем для частиц катодных лучей. Последующие точные измерения окончательно доказали тождественность бета-лучей и катодных лучей. И те, и другие представляют собою поток электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, причем скорость их в излучении радиоактивных веществ значительно больше, чем в катодных лучах. В 1901 году Беккерель и Пьер Кюри обнаружили физиологическое действие радиоактивного излучения. Кюри, держа в течение десяти часов руку перед ампулой с солями радия, как и Беккерель, который случайно положил

---

[1] Отражение, преломление, как и другие оптические свойства рентгеновских лучей, были открыты значительно позже, во втором десятилетии XX в., при пропускании рентгеновских лучей через кристаллы.

такую ампулу в жилетный карман, получили серьезные ожоги, излечить которые удалось лишь через несколько месяцев. За открытие и исследование радиоактивности трем ученым — Анри Беккерелю, Пьеру и Марии Кюри — была присуждена в 1903 году высшая международная награда — Нобелевская премия по физике.

За свои научные заслути Беккерель еще в 1889 году был избран членом Парижской академии наук. Он был также почетным членом ряда иностранных академий наук, в том числе Итальянской и Берлинской.

Умер Анри Антуан Беккерель 25 августа 1908 года.

ТРУДЫ А. А. БЕККЕРЕЛЯ

Беккерель А. О новом свойстве материи, называемом радиоактивностью. Речь, произнесенная в Стокгольме 11 декабря 1903 г. Анри Беккерелем, членом Академии наук Французского института.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19. стр. 139—157, илл.

В примечаниях, составленных М. И. Радовским, приводятся биографические сведения о Беккереле, извлеченные из отчета о присуждении ему Нобелевской премии.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. А. БЕККЕРЕЛЯ

Беккерель Антуан Анри (1852—1908). — БСЭ, 2-е изд., т. 4, 1950, стр. 404, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. 1. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1929, стр. 37—38.

Дарбу Г. Памяти Анри Беккереля. — «Физическое обозрение», 1908, т. 9, № 6, стр. 329—331.

Речь, произнесенная на похоронах Анри Беккереля от имени Парижской академии наук ее непременным секретарем — математиком Гастоном Дарбу (1842—1917).

История открытия Беккереля рассказана в следующих работах:

Кюри М. Радиоактивность. Пер. с франц. З. В. Ершовой и В. Д. Никольского. Под ред. В. И. Баранова. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 117—118.

Глава: Открытие радиоактивности и радиоактивных элементов.

Корсунский М. И. Атомное ядро. Изд. 5-е, переработ. М.—Л., Гостехиздат, 1956, стр. 7—11.

Раздел: Открытие Беккереля.

Андреев Б. Г. Вещество, его превращения и строение. М., ГАИЗ, 1937, стр. 113—115.

Степанов Б. У колыбели современной науки. (К 30-летию со дня смерти Анри Беккереля). — «Наука и жизнь», 1938, № 8, стр. 58—59.

Некоторые сведения об открытии Беккереля можно найти также в литературе, посвященной Марии и Пьеру Кюри (см. очерк о них).

ГЕНДРИК АНТОН ЛОРЕНЦ (ЛОРЕНТЦ)

(1853—1928)

Гендрик Антон Лоренц — один из крупнейших физиков-теоретиков конца XIX — начала XX вв., творец классической электронной теории — родился 18 июля 1853 года в г. Арнхеме (Голландия). В 1870—1872 гг. он учился в Лейденском университете, затем преподавал физику в вечерней школе Арнхема. В 22 года Лоренц защитил докторскую диссертацию, показав себя при этом уже зрелым физиком-теоретиком. Начиная с 1878 года в течение 35 лет он был профессором теоретической физики в Лейденском университете. С 1923 года Лоренц поселился в Хаарлеме, где до конца своей жизни занимал пост директора Исследовательского института имени Тейлора.

Благодаря своим выдающимся научным заслугам Лоренц пользовался исключительно большим авторитетом в научном мире. Он неоднократно был председателем международных научных конгрессов, возглавлял так называемый Комитет интеллектуального сотрудничества при Лиге наций.

Лоренц прославился и как блестящий популяризатор науки, выступал с лекциями во многих странах Европы и Америки, был автором руководства по физике и математике, пользовавшегося в свое время огромным успехом.

В 1925 году с большой торжественностью, при участии ученых почти всех стран Европы, в Лейдене и Хаарлеме был отмечен 50-летний юбилей научной деятельности ученого.

Умер Лоренц в Хаарлеме 4 февраля 1928 года.

Главным делом всей жизни Лоренца было создание электронной теории вещества, в основу которой легли представления о существовании элементарных зарядов электричества (электронов) как источника электрического поля и как составных частей атомов вещества.

Уже в начале своей научной деятельности Лоренц выступил убежденным сторонником максвелловской теории электромагнитного поля, к ко-



Гендрик Антон Лоренц

торой в то время, до знаменитых опытов Герца, большинство физиков относилось с недоверием. В своей первой научной работе, представленной в качестве докторской диссертации (1875 г.), Лоренц на основе теории Максвелла объяснил явления отражения и преломления света на границе двух сред.

Однако Максвелл в своей теории пользовался лишь понятиями электрического и магнитного полей (как особых, напряженных состояний мирового эфира) и обходил вопрос о том, что представляет собою сам источник электрического поля — электрический заряд. Вопрос о существовании электрических зарядов как элементарных количеств электричества во второй половине XIX века был одним из наиболее спорных. После появления теории Максвелла некоторые ученые (Пойнтинг, Оствальд, Мах, — 80-е гг.) стали вовсе отрицать реальное существование электрического заряда, рассматривая его лишь как математический символ в уравнениях теории электричества.

С другой стороны, многие крупные физики заняли противоположную позицию. Они развивали высказанную Фарадеем еще в 30-х годах глубокую идею о связи между электрическими силами и атомами вещества. В ряду этих ученых одним из первых выступил Лоренц. В 1878 году он высказал мысль, что молекулы состоят из мельчайших электрически заряженных частиц (ионов[1], как он их тогда называл), одинаковых по величине заряда и противоположных по его знаку.

В начале 80-х годов мысль о существовании мельчайших электрически заряженных частиц высказывали Гельмгольц, назвавший их «атомами электричества», В. Крукс, считавший катодные лучи потоком таких частиц, Дж. Стоней, который впервые назвал эти гипотетические частицы электронами. Окончательно существование элементарных количеств отрицательного электричества — электронов — было доказано в экспериментальных работах Дж. Дж. Томсона в конце 90-х годов XIX века.

Лоренц начал разрабатывать свою теорию электрического строения вещества еще до открытия электрона. В 90-е годы работы Лоренца, нашедшие к этому времени подтверждение в экспериментах Дж. Дж. Томсона, были завершены созданием классической электронной теории вещества.

Годом рождения электронной теории считается 1895-й, когда Лоренц в своей книге «Опыт теории электромагнитных и оптических явлений в движущихся телах» (Лейден, 1895 г.) дал основные уравнения этой теории. В 1903 году, в пятом томе немецкой «Энциклопедии математических наук», он сформулировал основные положения электронной теории. Наконец, в 1909 году в Лейпциге был опубликован знаменитый труд Лоренца «Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения», в котором он подытожил свои многолетние исследования и дал наиболее полное изложение электронной теории.

Излагая ход своих исследований, Лоренц писал: «... в этой (максвелловской. — *С. Е.*) общей теории мы, чтобы выразить особенные свойства

---

[1] Термин введен Фарадеем в его работах по электролизу.

различных весомых тел, просто приписываем каждому из них специальные значения диэлектрической постоянной ε проводимости β и магнитной проницаемости μ ». Если же, продолжает Лоренц, мы хотим «...понять, каким образом электрические и магнитные свойства зависят от температуры, плотности, химического строения или кристаллического состояния вещества, то мы не можем удовлетвориться простым введением для каждого вещества этих коэффициентов, значения которых должны определяться из опыта; мы будем принуждены обратиться к какой-нибудь гипотезе относительно механизма, лежащего в основе всех этих явлений.

Эта необходимость и привела к представлению об электронах, т. е. крайне малых электрически заряженных частичках, которые в громадном количестве присутствуют во всех весомых телах»[1].

Основные положения теории Лоренца сводятся к тому, что все тела состоят из атомов, составными частями которых являются электроны и положительно заряженные частицы[2] с массой, значительно (почти в 2 000 раз) большей, чем у электрона. Все тела (особенно металлы) содержат также большое количество свободных электронов. При своем движении электроны и положительные частицы электричества создают вокруг себя магнитные поля, а при замедлении или ускорении движения излучают электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, равной скорости света. Электромагнитное поле в свою очередь влияет на поведение электронов и положительных частиц электричества.

Лоренц установил далее характер движения электронов в электромагнитном поле и ввел понятие суммарной «лоренцовой силы», действующей в электромагнитном поле на электрон.

На основе электронных представлений о веществе Лоренц объяснил целый ряд уже известных физических факторов и предсказал ряд других, существование которых потом подтвердилось. Еще в 1880 году он самостоятельно вывел формулу связи диэлектрической постоянной с плотностью вещества диэлектрика и из нее — зависимость показателя преломления среды от ее плотности (формула Лоренца—Лоренца) [3]. Эта формула косвенно подтвердила теорию Максвелла и вместе с тем связала через показатель преломления диэлектрическую и магнитную проницаемости с плотностью вещества [4]. Позже, в 1903 году Лоренц вскрыл физическую сущность диэлектрической и магнитной проницаемостей и проводимости и впервые теоретически вычислил диэлектрическую постоянную, которая до того определялась лишь из опыта. На основе электронной теории материи Лоренц развил электронную теорию дисперсии света, а также объяснил зависимость электропроводности вещества от его теплопроводности.

---

[1] Лоренц Г. А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М., 1956, стр. 28.

[2] Эти частицы Лоренц называл положительными электронами.

[3] Эту формулу в том же году вывел независимо от Г. А. Лоренца Л. В. Лоренц (Дания).

[4] Связь диэлектрической и магнитной проницаемости с показателем преломления среды была теоретически установлена Максвеллом, исходившим из электромагнитных представлений о свете.

Лоренц предсказал явление расщепления спектральных линий в том случае, если источник излучения находится в сильном магнитном поле. Когда это явление действительно было открыто (1896 г.) его учеником Зееманом (явление Зеемана), Лоренц разработал теорию этого явления и предсказал, также открытую позже, определенную поляризацию компонентов расщепленных линий. Открытие и исследование явления Зеемана блестяще подтвердили справедливость электронной теории. За эти работы Лоренц и Зееман получили в 1902 году Нобелевскую премию по физике.

Классическая электронная теория Лоренца получила всемирное признание. Она, казалось, открывала возможность объяснить все явления природы на электромагнитной основе и нарисовать таким образом стройную единую электромагнитную картину мира вместо устаревшей механистической. Однако возможности ее оказались также ограниченными. С ее помощью не удавалось объяснить закономерности теплового излучения. Попытка объяснить эти закономерности, опираясь на положение электронной теории, привели к парадоксальному и противоречившему наблюдениям выводу, что излучение энергии любым источником с уменьшением длины волны должно неограниченно расти (так называемая «ультрафиолетовая катастрофа»).

Причина этого вывода стала понятна лишь в 1900 году после работ Планка, который вскрыл принципиальную невозможность объяснить спектр теплового излучения на основе классической электронной теории. Закономерности в распределении энергии в спектре абсолютно черного тела оказалось возможным объяснить лишь на основе квантовой физики.

В тесной связи с электронной теорией вещества находится развитая Лоренцом в 90—900-е годы его электродинамика движущихся сред, т. е. теория электромагнитных и, прежде всего, оптических явлений в движущихся телах. Впервые эта теория была изложена в упомянутой уже работе Лоренца 1895 года («Опыт теории электромагнитных и оптических явлений в движущихся телах»). В своей электродинамике Лоренц опирается на гипотезу абсолютно неподвижного эфира [1], в котором движутся тела, состоящие из заряженных частиц.

Принцип относительности Галилея, перенесенный Герцем в электродинамику, в теории Лоренца выполняется лишь для движений со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света в пустоте. Для движений со скоростями, сравнимыми со скоростью света, должно обнаруживаться, согласно электродинамике Лоренца, различие электромагнитных и, в частности, оптических явлений в движущихся и покоящихся телах. Так, например, скорость света в тех и других должна быть различной. Противоречие последнего вывода опыту Майкельсона, в котором в 1881 году (и при многократном повторении в последующие годы) обнаружилось постоянство скорости света в движущихся и покоящихся телах, Лоренц пытался устранить с помощью гипотезы, которую он и независимо от него

---

[1] Выдвинутая до этого гипотеза Герца о полном увлечении эфира движущимися телами была оставлена как противоречащая опыту Физо. Другая гипотеза, выдвинутая Френелем (гипотеза частичного увлечения эфира), как показал Лоренц, также оказывалась излишней.

Фицджеральд высказали еще в 1892—1893 гг., — гипотезы сокращении размеров тел в направлении движения: этим сокращением компенсируется изменение скорости света от движения тела. В результате скорость света кажется постоянной. Возможность такого сокращения размеров тел Лоренц объяснил на основе своей электронной теории вещества. Кроме того, он ввел понятие «местного времени», которое в движущихся телах должно течь иначе, чем в неподвижных. Для характеристики этих изменений размеров (координат) и времени при переходе от покоящихся к движущимся телам Лоренц использовал формулы, выведенные в 1887 году немецким физиком Фойгтом для другой задачи. Впоследствии Анри Пуанкаре назвал эти формулы «преобразованиями Лоренца», а сокращение масштабов — «лоренцовым сокращением». Преобразования Лоренца и гипотеза сокращения были изложены им в статье, вышедшей в 1904 году в Амстердаме: «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света».

Впоследствии Эйнштейн на совершенно новой основе объяснил явление изменения размеров тел при их быстром движении. Преобразования Лоренца стали в руках Эйнштейна мощным аргументом против представлений о существовании мирового эфира. Эйнштейн вскрыл глубокий физический смысл преобразований Лоренца и построил с их помощью специальную теорию относительности.

Таким образом, электронная теория Лоренца и связанная с ней электродинамика движущихся сред, несмотря на принадлежность их основных положений классической физике, составили тот важнейший переходный этап в физике, который подготовил создание двух новых грандиозных областей теоретической физики — теории квантов и теории относительности.

Последние научные работы Лоренца относились к проблемам применения статистической механики и теории вероятностей в области молекулярной физики и теории теплового излучения. В 1912 году в Коллеж де Франс Лоренц читал курс лекций, изданных в 1916 году в виде отдельной книги — «Статистические теории в термодинамике».

Лоренц был убежденным материалистом. Горячо приветствуя появление новых физических теорий в начале XX века, он выступил с резкой критикой взглядов тех физиков, которые, не разобравшись в новых физических фактах из области микромира, поспешно делали выводы об отсутствии причинности в окружающей нас действительности.

ТРУДЫ Г. А. ЛОРЕНЦА

Лоренц Г.-А. Теория электромагнитного поля. Пер. с нем. К. Ф. Теодорчик. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1933. 172 стр.

Перевод лекций, читанных Г. А. Лоренцем в 1900—1902 гг.

Лоренц Г.-А. Теория и модели эфира. Пер. с англ. под ред. А. К. Тимирязева и З. А. Цейтлина. С предисл. А. К. Тимирязева. М.—Л., ОНТИ Глав. ред. общетехн. лит. и номографии, 1936. 68 стр.

Лекции, прочитанные в Лейденском университете в 1901—1902 гг.

Лоренц Г.-А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. Пер. с англ. проф. М. В. Савостьяновой. Под ред.

чл.-кор. АН СССР Т. П. Кравца. Изд. 2-е, испр. и доп. М., Гостехиздат, 1956. 472 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия) .

Лекции, прочитанные Г. А. Лоренцем в Колумбийском университете в 1906 году. Первое советское издание этого труда вышло в 1934 году.

Лоренц Г.-А. Статистические теории в термодинамике. Лекции, прочитанные в Collège de France в ноябре 1912 г., обработанные в 1913 г. Л. Дюнуайе. Пер. с франц. под ред. и с доп. Ю. А. Круткова. Л.—М., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 155 стр.

Лоренц Г.-А. Лекции по теоретической физике. 1. Теория излучения. Лекции, читанные в Лейденском университете и обработанные А. Д. Фоккером. Пер. с нем. Е. Л. Старокадомской. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. дисциплин и номографии, 1935. 80 стр.

Лоренц Г.-А. Лекции по термодинамике. Пер. с англ. М. Е. Гинзбурга. Под ред. проф. К. В. Астахова. М.—Л., Гостехиздат, 1946. 156 стр.; 1 л. портр.

Из лекций по теоретической физике, также читанных автором в Лейденском университете.

Принцип относительности. Г.-А. Лоренц. А. Пуанкаре. А. Эйнштейн. Г. Минковский. Сборник работ классиков релятивизма. Под ред. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко. Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 387 стр. (Классики естествознания).

В сборник вошли две работы Г.-А. Лоренца: Интерференционный опыт Майкельсона (впервые опубликовано в 1895 г.).— Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света (впервые опубликовано в 1904 г.).

Лоренц Г.-А. Курс физики. Разреш. автором пер. с нем. Н. П. Кастерина. 2-е, испр. и доп. изд. Т. 1—2. Одесса, «Mathesis», 1912—1915.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г. А. ЛОРЕНЦА

Лоренц Гендрик Антон (1853—1928).— БСЭ, 2-е изд., т. 25. 1954, стр. 413—414, портр.

Биография Г.-А. Лорентца.— В кн.: Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма. Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935, стр. 345—347.

Ильин Б. В. К юбилею Г. А. Лорентца.— «Успехи физ. наук», 1925, т. 5, вып. 6, стр. 411—414.

Краткий обзор жизни и научного творчества, главным образом в области разработки электронной теории.

В ознаменование 50-летия научной и педагогической деятельности Лоренца редакция «Успехов физических наук» посвятила ему весь 5-й том своего журнала, составленный из оригинальных и переводных статей по различным вопросам физики.

Фредерикс В. К. Генрик Антон Лорентц. (К 50-летнему юбилею его научной деятельности. 1875—1925 гг.).— «Электричество», 1926, № 4, стр. 207—209.

Лазарев П. П. Юбилей Г.-А. Лоренца и голландская наука.— «Науч. работник», 1926, № 1, стр. 120—127.

Воспоминания автора, присутствовавшего в качестве участника делегации СССР на юбилейных торжествах в Голландии в декабре 1925 года.

* *
*

По случаю кончины Г.-А. Лоренца 4 февраля 1928 года появились в наших журналах следующие некрологи:

Лазарев П. П. Генрих Антон Лоренц.— «Науч. работник», 1928, № 8—9, стр. 111—112.

Баржанский Л. Г.-А. Лоренц. (К его кончине 4 февраля 1928 г. в Голландии).— «Вестник инженеров», 1928, № 3, стр. 187.

Лебединский В. К. Генрик Антон Лоренц.— «Электричество», 1928, № 7—8, стр. 121—122.

* *
*

Кравец Т. П. Г.-А. Лоренц и теория электронов.— В кн.: Лоренц Г.-А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М., Гостехиздат, 1956, стр. 9—16.

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 250—255, 265—276, 369—370 и др. (см. именной указатель).

ДЖОЗЕФ ДЖОН ТОМСОН

(1856—1940)

Д. Д. Томсон, один из крупнейших физиков конца XIX — начала XX вв., родился 18 декабря 1856 года в г. Четэме, недалеко от Манчестера. В 1876—1880 гг. он учился в Тринити-колледже (при Кембриджском университете), после окончания которого работал в знаменитой Кевендишской лаборатории, основанной при университете Максвеллом. В Кембридже, в Кевендишской лаборатории, профессором и директором которой Томсон стал с 1884 года, а затем в Тринити-колледже, где он с 1919 года занимал пост президента, прошла долгая, исключительно плодотворная творческая жизнь ученого.

С 1884 года Томсон был членом, а с 1915 по 1920 гг.— президентом Лондонского королевского общества.

Первые научные работы Томсона были посвящены обоснованию и дальнейшему развитию электромагнитной теории Фарадея—Максвелла.

Одним из первых Томсон занялся теоретическими исследованиями электромагнитных явлений в движущихся телах и уже в 1881 году в работе «Об электрическом и магнитном эффекте, производимом движением наэлектризованных тел» сообщил о своем первом замечательном открытии. Он пришел к фундаментальному выводу о том, что инертная масса движущегося наэлектризованного тела должна быть больше, чем покоящегося, за счет добавления возникающей при движении такого тела «электромагнитной массы», понятие которой было им же впервые введено. Эти теоретические выводы и связанные с ними расчеты Томсона получили блестящее подтверждение в дальнейшем в опытах немецкого физика В. Кауфмана (1902 г.).

Вскоре после своего первого открытия Томсон сделал и другой исключительно важный вывод — о связи между энергией движущегося заряженного тела и его массой ($E=mc^2$).

Спустя 14 лет это соотношение на совершенно иной основе вывел Эйнштейн.



Джозеф Джон Томсон

Исследования Томсона в области электромагнетизма тесно примыкали к его работам по механике, именно по теории вихревого движения идеальной жидкости. Уже первые работы его в этой области были отмечены премией Адамса (1882 г.). Томсон детально разработал теорию вихревого движения и на этом основании развил свою концепцию вихревого электромагнитного поля.

Томсон был одним из крупнейших представителей механистического направления в физике. Он считал возможным все явления природы свести к механическим движениям и выразить все процессы при помощи уравнений динамики. Электрические и магнитные поля Томсон представлял себе как вихри в особой тонкой среде — мировом эфире.

Эта гипотеза и привела его к двум замечательным открытиям — зависимости электромагнитной массы заряженного тела от скорости и связи между массой и энергией тела в этом случае.

Однако дальнейшее детальное развитие Томсоном механических представлений об электромагнитном поле, чему он посвятил более 30 лет жизни, выявило односторонность, ограниченность этих представлений. Несмотря на отдельные успехи, Томсону не удалось осуществить свою мечту — создать единую механическую картину физических явлений. Тем не менее до конца своей жизни он убежденно защищал вихревую теорию поля и гипотезу эфира. В последние годы жизни Томсон пытался построить вихревую модель кванта света. К теории квантов Планка — Эйнштейна, как и к теории относительности Эйнштейна, он отнесся крайне скептически.

С 1884 года Томсон начинает свои обширные многолетние исследования электрического разряда в газах.

Возможности изучения этого явления чрезвычайно возросли после открытия в 1895 году рентгеновских лучей, обладающих очень большой способностью ионизовать газ.

Вскоре Кембриджский университет учредил даже специальные стипендии для исследования в этой области.

Начиная с 90-х годов над проблемой газового разряда работали в Кэвендишской лаборатории под руководством Томсона многие впоследствии знаменитые физики — Резерфорд, Ланжевен, Таунсенд, Вильсон, Астон, Г. П. Томсон (сын ученого) и др.

В результате при самом непосредственном участии Томсона в период 1895—1900 гг. была установлена ионная природа тока в газах и создана теория ионизации газов. Исследований в области газового разряда Томсон не оставлял в течение всей своей жизни. В последующие годы (1908—1930) он детально изучал различные виды разряда в газе и еще более углубил теорию газового разряда.

Большое внимание Томсон уделял явлениям, сопровождающим газовый разряд. С этой целью он начал исследования катодных лучей, природа которых в то время еще не была в полной мере выяснена. Эти исследования завершились замечательным результатом — открытием первой элементарной частицы — электрона.

Гипотезу о реальности существования элементарного количества электричества впервые наиболее решительно высказал Гельмгольц (1881 г.). Тогда же английский физик Д. Стоней дал имя этой гипотетической ча-

стице электричества — «электрон». Опираясь на эту гипотезу, Лоренц в эти же годы начал создание своей электронной теории вещества.

Электрон, таким образом, уже «участвовал» в развитии физики, но само существование его еще не было доказано. Поэтому открытие Томсоном электрона, о котором он сообщил впервые в Лондонском королевском обществе 29 апреля 1897 года, явилось настоящим триумфом физической теории, предсказавшей существование этой частицы.

Еще до начала работ Томсона было замечено, что катодные лучи отклоняются в магнитном поле и заряжают поставленный на их пути проводник отрицательным зарядом. Но этот эффект можно было объяснить как в случае корпускулярной природы катодных лучей, так и в том случае, если бы они представляли собою своеобразный проводник с током. Решающим экспериментом явился бы опыт, который показал бы отклонение катодных лучей в электрическом поле конденсатора. Проводник с током не реагирует на электрическое поле, и только поток заряженных частиц должен был отклониться в нем в ту или другую сторону. Однако все попытки наблюдать это отклонение оказывались тщетными.

Томсон также многократно повторял этот опыт и впервые заметил «вздрагивание» катодного пучка в начальный момент. Продолжая свои исследования, он обнаружил сильное ионизирующее действие катодных лучей на оставшийся в катодной трубке воздух и понял, что причина неудач прежних опытов заключается в недостаточно высоком вакууме в катодной трубке: лучи быстро разряжают конденсатор. Ценою огромных усилий Томсон добился получения достаточно высокого вакуума в катодной трубке и первым наблюдал явное отклонение катодных лучей в сторону положительно заряженной пластинки конденсатора. Этими тончайшими опытами он доказал, что катодные лучи представляют собою поток мельчайших отрицательно заряженных корпускул, заряд которых в точности равен заряду иона водорода (возникающего при электролизе), а масса составляет, как писал Томсон, «менее одной тысячной доли массы атома водорода»[1]. За эти исследования он был удостоен в 1906 году Нобелевской премии.

На основании представлений об электронах Томсон в 1898 году высказал мысль, что рентгеновские лучи возникают вследствие торможения быстрых электронов — катодных лучей на антикатоде. Одним из первых он объяснил высокую электропроводность и ряд других свойств металлов наличием в них свободных электронов.

Томсон сделал из своего открытия важнейший вывод о том, что атом обладает сложной структурой и что электроны являются составной частью любого атома. При известных условиях они, согласно Томсону, могут отрываться от него (процесс ионизации), существовать самостоятельно, вне атома, а также вновь присоединяться как к положительно заряженному атому (положительному иону), так и к нейтральному, образуя в последнем случае отрицательный ион.

В 1903 году Томсон предложил свою модель атома, представляющую положительно заряженное облако материи с вкрапленными в него симмет-

---

[1] «Успехи химии», 1941, т. 10, вып. 1, стр. 106.

рично расположенными электронами, которые могут (под действием например, внешнего электрического поля) смещаться внутри атома, испытывая упругие колебания в нем около некоторого положения равновесия.

Дальнейшие исследования, связанные с изучением явлений радиоактивности, обнаружили противоречие между этой моделью атома и наблюдаемыми явлениями, и в 1913 году модель атома Томсона вынуждена была уступить место новой, более близкой к реальной действительности планетарной модели атома Резерфорда—Бора. Тем не менее историческое значение модели Томсона исключительно велико. Это была первая построенная на экспериментальной основе модель *сложного* атома [1], окончательно разбившая вековые представления о неделимости атома, о том, что атом — последняя, элементарная частица материи.

Исходя из своей модели атома, Томсон впервые дал физическое объяснение периодической системы Менделеева, выявил решающую роль электрона в химических реакциях.

Стремление изучить положительно заряженную часть атома привело Томсона к исследованию так называемых каналовых лучей. Он доказал, что каналовые лучи представляют собою поток положительно заряженных (ионизованных) атомов. В процессе этих исследований Томсон предложил свой знаменитый «метод парабол» (1911 г.) — метод изучения заряженных частиц по их следам на фотографической пластинке, в условиях, когда на частицы действуют электрическое и магнитное поля, стремящиеся отклонить частицу во взаимно перпендикулярных направлениях. Траектория частицы — ее след на пластинке в этом случае приобретает форму параболы, которая тем круче, чем масса частицы меньше.

С помощью этого метода Томсон в 1912 году впервые открыл два стабильных изотопа [2]—Ne^{20} и Ne^{22}. Окончательно природу этих элементов установил в 1919 году ученик Томсона английский физик Ф. Астон, который построил масс-спектрограф — прибор для измерения масс заряженных частиц, главным образом для выявления изотопов. Приборы такого рода — масс-спектрографы и масс-спектрометры — получили в настоящее время самое широкое распространение в науке и технике.

По своим философским воззрениям Томсон был механистическим материалистом. Он был глубоко убежден в безграничности возможностей познания природы и в бесконечности самого процесса познания. Еще до открытия дифракции электрона — открытия, сильно поколебавшего представление об электроне как о мельчайшей частице материи,— Томсон в 1926 году первый поставил вопрос о внутреннем строении электрона. В ряде работ (1926, 1930, 1934, 1936 гг.). он предложил даже свою модель строения электрона. В замечательной книге «По ту сторону электрона»

---

[1] Первые догадки Вебера о сложной структуре атома и даже предложенная им первая планетарная модель атома (середина XIX в.) не опирались на экспериментальные исследования и вскоре были забыты.

[2] Само название «изотопы» было предложено несколько позднее (Ф. Содди). Стабильными изотопами называют устойчивые (в отличие от ранее открытых радиоактивных) химические элементы, атомы которых имеют один и тот же заряд ядра и, следовательно, одинаковые химические и оптические свойства, но несколько различные массы ядер. В периодической системе Менделеева они занимают одну и ту же клетку, откуда и произошло название, означающее: «занимающие одно место».

великий ученый писал: «Возможно, что кое-кто из читателей поставит вопрос, не значит ли это слишком далеко заходить, делая попытку заглянуть в область, лежащую по ту сторону электрона. Должна же быть проведена где-нибудь пограничная черта. Но отсутствие твердых и резких демаркационных линий есть одна из самых заманчивых особенностей физики. Каждое новое открытие не является пределом, дальше которого идти нельзя, а, наоборот, служит проспектом, ведущим в новые, еще не исследованные страны, и, пока наука будет существовать, будет существовать великое множество нерешенных проблем, исключая всякую опасность наступления когда-либо эпохи безработицы для физиков» [1].

Умер Д. Д. Томсон 30 августа 1940 года.

ТРУДЫ Д. Д. ТОМСОНА

Томсон Д. Д. Начала математической теории электричества и магнетизма. Пер. со 2-го англ. изд. под ред. проф. А. И. Садовского. Спб., К. Л. Риккер, 1901. VIII, 399 стр.

Томсон Д. Д. Корпускулярная теория вещества. Пер. с англ. И. Левинтова под ред. «Вестника опытной физики и элемент. математики». [Одесса], «Матезис», [1910]. VI, 162 стр.

Из работ 1907 года.

Томсон Д. Д. Взаимоотношение между материей и эфиром по новейшим исследованиям в области электричества. Пер. под ред. проф. И. И. Боргмана. Спб., Т-во «Естествоиспытатель», 1910. 23 стр.

Томсон Д. Д. Передача электричества в металлах.— «Физическое обозрение», 1916, т. 17, № 6, стр. 258—277.

Томсон Дж. Материя, энергия, эфир. Пер. С. Т. Конобеевского.— В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физика. Вып. 2. М.—Л., Госиздат, 1924, стр. 171—203.

Речь, произнесенная на съезде Британской ассоциации в Виннипеге (Канада) в 1909 году. В несколько сокращенном виде эта же речь была выпущена отдельным изданием: Томсон Д. Д. Материя, энергия и эфир. Пер. С. А. Алексеева. Под ред. С. О. Майзель. Спб., «Физика», 1911. 56 стр.

Томсон Д. Д. Электричество и материя. Пер. с послед. (5-го) англ. изд. 1924 г. С. Давыдова и Н. Лихтгейма. Под ред. проф. А. К. Тимирязева и З. А. Цейтлина с предисл. А. К. Тимирязева и многими прил. М.—Л., Госиздат, 1928. 263 стр., илл., портр.

Помимо труда «Электричество и материя», в котором изложены основные взгляды Томсона на строение электромагнитного поля, в книге в качестве приложений приводятся еще следующие его работы: Материя и эфир.— Структура света (с предисл. А. К. Тимирязева).—Фарадеевы силовые трубки и уравнения Максвелла (перевод начала первой главы из книги «Новейшие исследования в области электричества и магнетизма», опубликованной в 1893 г.).

Томсон Д. Д. Электрон в химии. Пер. с англ. И. А. Каблукова и Н. А. Железновой. М.—Л., Госиздат, 1927. VIII, 156 стр. (Современ. проблемы естествознания. Кн. 36).

Пять лекций, прочитанных Томсоном в Франклиновском институте в Филадельфии в апреле 1923 года.

[1] Томсон Д. Д. По ту сторону электрона. М., 1930, стр. 4.

Томсон Д. Д. По ту сторону электрона. Пер. с англ. М., 1930. 34 стр. (Тимирязев. науч.-исслед. ин-т изучения и пропаганды естествознания с точки зрения диалект. материализма).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Д. Д. ТОМСОНА

Томсон Джозеф Джон (1856—1940).— БСЭ, 2-е изд., т. 42, 1956, стр. 614—615, портр.

Савостьянов М. В. Памяти Дж. Дж. Томсона.— «Природа», 1941, № 1, стр. 106—107.

Капцов Н. А. Джозеф Джон Томсон.— «Сов. наука», 1940, № 10, стр. 88—108, портр.

В переработанном виде эта же статья напечатана в журнале «Электричество», 1941, № 3, стр. 79—85.

В статье приводятся важнейшие даты из биографии Томсона, говорится о его работе в Кевендишской лаборатории, о темах первых его научных работ, о последующих его работах — по газовому разряду, электромагнетизму, теории строения вещества, теории атома, о работах тридцатых годов и, наконец, о последних его работах.

Тимирязев А. К. Жизнь и труды Дж. Дж. Томсона (1856—1940).— «Успехи химии», 1941, т. 10, вып. 1, стр. 101—110, илл.

Краткий очерк жизни и деятельности. Материалом для очерка послужила автобиография Дж. Дж. Томсона, опубликованная в Лондоне в 1936 году под названием «Воспоминания и размышления». Изложено последовательное развитие физических идей Томсона, очерчен ход теоретических исследований, приведших к открытию электрона, и др. Отмечается, в частности, присущее Томсону искусство наполнять математические уравнения живым физическим содержанием. Значительное место в очерке уделено философским взглядам Дж. Томсона.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 241—250, 355—361. 365—369 и др. (см. именной указатель).

Лауэ М. История физики, стр. 119—120, 124.

Цейтлин З. А. Развитие воззрений на природу света.— В кн.: Томсон Дж. Дж. Электричество и материя. М.—Л., 1928, стр. 132—171.

Дж. Томсону посвящены следующие разделы статьи: Электромагнитная теория света Максвелла в истолковании Дж. Дж. Томсона (стр. 151—154).— Гипотеза Эйнштейна, дополняющая теорию излучения Томсона (стр. 154—155).— Критика теории Томсона — Эйнштейна (стр. 155—159).— Новая теория Дж. Дж. Томсона (стр. 166—171).

Цейтлин З. А. Вихревая теория материи, ее развитие и значение.— В кн.: Томсон Дж. Дж. Электричество и материя. М.—Л., 1928, стр. 199—217.

Работы Дж. Дж. Томсона по вихревому движению, их содержание и значение (стр. 210—211, 214).

ГЕНРИХ РУДОЛЬФ ГЕРЦ

(1857—1894)

Выдающийся немецкий физик Генрих Рудольф Герц родился 22 февраля 1857 года в Гамбурге в семье адвоката. Имея большую склонность к научным занятиям и к технике, Герц решил вначале избрать профессию инженера. Крайне требовательный к себе, он считал свои способности недостаточными для того, чтобы быть ученым. С 1875 года в течение трех лет он учился в политехнических школах Дрездена и Мюнхена. В эти годы окончательно определилось его настоящее призвание—наука, и прежде всего физика. Герц оставляет техническое училище и в 1878 году поступает в Берлинский университет, где в то время читали лекции Гельмгольц и Кирхгоф. Через два года, получив степень доктора, Герц становится ассистентом Гельмгольца. В 1883 году он читает лекции по физике в университете г. Киля, с 1885 по 1889 гг. Герц — профессор Высшей технической школы в г. Карлсруэ, с 1889 года — профессор Боннского университета.

Герц умер 1 января 1894 г. в результате тяжелой болезни, совсем молодым, 37 лет от роду.

Несмотря на свою чрезвычайно короткую жизнь, этот замечательный ученый успел вписать в историю физики одну из лучших ее страниц: знаменитые электродинамические опыты Герца — важнейшая и бессмертная заслуга ученого—явились первым прямым доказательством правильности теории электромагнитного поля Фарадея—Максвелла и ее основного следствия — электромагнитной теории света.

Вопросам электродинамики была посвящена в основном вся научная деятельность Герца. В первых двух работах, выполненных им в 1878—1879 гг., он стремился выяснить, обладают ли инерцией электрические заряды при их движении в проводнике (ток). Именно наличием инерции зарядов Вебер пытался объяснить возникновение экстратоков при замыкании и размыкании цепи. Герц доказал практическое отсутствие такой инерции. Первая из этих его работ — «Кинетическая энергия движущихся

зарядов» — была удостоена золотой медали университета, вторая — «Об индукции во вращающихся телах» — стала докторской диссертацией Герца. В том же 1879 году Герц по совету Гельмгольца взялся за экспериментальное разрешение исключительно актуальной в то время задачи, предложенной в качестве конкурсной Берлинской академией наук. Задача сводилась к тому, чтобы выяснить, существуют ли токи смещения [1], введенные Максвеллом в качестве одной из основных гипотез его теории электромагнитного поля и вызывавшие вначале большое недоверие. С этого года начинается обширная серия экспериментальных исследований Герца, целью которых, как писал впоследствии ученый, «...была проверка основных гипотез теории Фарадея—Максвелла...» [2].

После долгих неудач, в основном объяснявшихся малой частотой электрических колебаний, источником которых служила тогда искра при разряде лейденской банки, Герц изобрел новый источник электрических колебаний — так называемый открытый вибратор, в простейшем случае— прямая проволока с разрывом посредине (искровой промежуток), обе части которой присоединялись к источнику переменного тока — индукционной катушке. С помощью такого вибратора Герц получил колебания с частотой в сотни, а затем и в тысячи раз большей, чем получали до него [3] (это изобретение Герца описано в работе 1887 года «О весьма быстрых электрических колебаниях»).

Герц обнаружил, кроме того, что вибратор, не соединенный с источником тока, может играть роль электрического резонатора, т. е. при искровом разряде в вибраторе искра проскакивает и в помещенном вблизи резонаторе, настроенном на ту же частоту. Пользуясь изобретенными им вибратором и резонатором, Герц в 1887—1888 гг. сделал открытия, обессмертившие его имя. 10 ноября 1887 года в докладе на заседании Берлинской академии наук «Об индукционных явлениях, вызываемых в изоляторах» Герц сообщил о положительном решении им конкурсной академической задачи 1879 года, т. е. доказал существование токов смещения. Более того, в этой работе он обнаружил, что электромагнитное поле как бы отрывается от своего источника — электрического вибратора и самостоятельно движется в пространстве.

В 1888 году при помощи вибратора и резонатора с частотой электрических колебаний в десятки миллионов в секунду [4] Герц установил, что это непрерывно «отслаивающееся» от источника электрических колебаний электромагнитное поле есть не что иное, как предсказанная Максвеллом электромагнитная волна. Герц показал также, что скорость распространения этой волны постоянна.

---

[1] См. очерк о Максвелле.

[2] 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 1. Из предистории радио. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 124.

[3] Принципиально электромагнитная волна возникает при любом малом изменении электрического поля, но, будучи в этих случаях очень слабой, она неощутима для физических приборов. Единица частоты электромагнитной волны, равная частоте в 1 колебание в 1 секунду, была позднее названа именем Герца.

[4] В десятки мггц (мегагерц).



Генрих Рудольф Герц

Исследуя при помощи резонатора пространство между вибратором и установленным на некотором расстоянии от него металлическим листом, Герц обнаружил стоячие электромагнитные волны, вначале длиной в несколько метров, и тем самым открыл явление отражения электромагнитных волн от проводящих поверхностей. Применив затем вибратор и резонаторы с частотой колебаний в сотни миллионов в секунду, Герц получил электромагнитные волны (лучи электрической силы, как он их называл) длиной всего 60 *см* (ультракороткие волны от электрического источника) «и произвел при их помощи все элементарные опыты, которые производятся со световыми и тепловыми лучами» [1].

Для изучения оптических свойств электромагнитных волн длиною в несколько десятков сантиметров (дециметровые волны) Герцу пришлось изготовить огромные многопудовые линзы и призмы из диэлектриков, где эти волны могли бы преломляться; большие параболические зеркала из металла — для отражения и фокусировки электромагнитных волн; металлические проволочные решетки для исследования диффракции волн и для того, чтобы установить направление колебаний векторов электрической и магнитной напряженностей в электромагнитной волне. При помощи этих приборов, в результате напряженной экспериментальной работы, он исследовал, помимо явления отражения, явления преломления, поляризации, интерференции и диффракции электромагнитных волн.

Герц доказал поперечность колебаний в электромагнитных волнах и показал, что скорость распространения этих волн равна скорости света, как предсказывал и Максвелл. В своих опытах Герц подтвердил также теоретически выведенное Максвеллом соотношение между коэффициентом преломления среды для электромагнитных волн и диэлектрической постоянной среды. Таким образом, в результате своих опытов Герц не только впервые экспериментально получил электромагнитные волны, но и показал, что они обладают всеми свойствами световых волн, т. е. что свет действительно представляет собою электромагнитные волны. Дальнейшие исследования многих физиков в конце XIX века и в первой четверти XX века (см. очерк о Лебедеве) окончательно подтвердили единую, электромагнитную природу радио-, тепловых и световых волн.

Сообщение о результатах своих опытов, сделанное Герцем 13 декабря 1888 года на заседании Берлинской академии наук, а затем опубликованное в его работе «О лучах электрической силы» (1889 г.), принесло ученому мировую славу. Русский физик О. Д. Хвольсон писал об этом: «Опыты Герца, классические на веки вечные, обратили на себя внимание не только ученых, занимающихся физикой, но и всего образованного мира. Ими навсегда будет отмечен один из важнейших моментов истории постепенного возникновения правильных взглядов на окружающие физические явления» [2].

---

[1] 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 1. Из истории радио. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 183.

[2] 50 лет радио. Вып. 1. Из предыстории радио. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 411.

Открытия Герца создали новый отдел физики — учение об электрических колебаниях. Практические результаты этих открытий не замедлили последовать и были поистине грандиозны. 7 мая 1895 года А. С. Попов сообщил о своем изобретении радиоприемника, а 24 марта 1896 года он осуществил первую на земном шаре радиопередачу: при помощи азбуки Морзе передал на расстояние без помощи проводов слова «Heinrich Hertz».

Во время опытов с электромагнитными волнами Герц в 1887 году обратил внимание на то, что при облучении ультрафиолетовыми лучами отрицательно заряженного разрядного шарика вибратора искра появлялась при бо́льших расстояниях между шариками, чем до облучения. В том же году он описал[1] это явление, названное позднее фотоэффектом, однако дальнейших его исследований не производил, так как все силы сосредоточил в то время на получении электромагнитных волн. Открытое Герцем явление фотоэффекта, детально исследованное в 1888 году А. Г. Столетовым и окончательно объясненное в 1905 году Альбертом Эйнштейном, имеет громадное значение в науке и технике, в частности в телевидении. Следует отметить, что Герц занимался исследованием и катодных лучей — физического явления, также легшего в основу телевидения. Ранняя смерть оборвала эти работы Герца.

Из экспериментальных работ Герца по электродинамике необходимо отметить его исследования (1888 г.) распространения электромагнитного поля вдоль проводников. Исследованиями в этой области до Герца занимались многие крупные физики — В. Вебер, У. Томсон, В. Бецольд, О. Лодж и др. При помощи своих высокочастотных излучателей — вибраторов Герц установил новый и важный факт: скорость распространения электромагнитной волны вдоль проводника почти такая же, как и в воздухе (т. е. близка к скорости света).

Герц открыл также, что электромагнитное поле проникает в металлический проводник лишь на очень небольшую глубину. Таким образом электромагнитная энергия оказывалась сосредоточенной (локализованной) в основном не в проводнике, а именно в окружающей его среде. Это еще раз подтвердило основную идею теории Фарадея—Максвелла, согласно которой электромагнитные силы действуют в каждой точке среды между зарядами, передаваясь в этой среде от точки к точке, т. е. идею близкодействия. Открытие Герца объяснило быстрый рост сопротивления проводов с увеличением частоты переменного тока (и, следовательно, частоты электромагнитного поля) [2].

Герц был не только блестящим экспериментатором, но и выдающимся теоретиком. Исходя из уравнений Максвелла для электромагнитного поля, он создал теорию своего «открытого вибратора» (диполя Герца).

---

[1] Герц Г. О действии ультрафиолетового света на разряд электричества.— В кн.: 50 лет волн Герца. М.—Л., Акад. наук СССР, 1938, стр. 136—155.

[2] При частоте электрического тока в 80 герц сопротивление проводника при диаметре 4 см увеличивается на 68% по сравнению с его сопротивлением в случае протекания по нему постоянного тока (см. сборник «50 лет радио», стр. 415).

В работе 1890 года «Основные уравнения электродинамики покоящихся тел» Герц (как и независимо от него английский физик О. Хевисайд) вывел уравнения Максвелла в современной симметричной форме, в которой наглядно показана полная взаимность электрических и магнитных действий. Развивая далее электродинамику Максвелла, Герц в том же 1890 году в работе «Основные уравнения электродинамики движущихся тел» впервые попытался дать теорию электромагнитных явлений в движущихся телах. В основу своей электродинамики Герц положил гипотезу о полном увлечении мирового эфира (т. е. той особой среды, в которой, по тогдашним представлениям, происходили все электромагнитные явления) движущимися телами, иными словами — о полной независимости электромагнитных и, в частности, оптических свойств тела от его движения. Таким образом, Герц распространил на область электромагнитных явлений принцип относительности Галилея о независимости механических явлений от равномерного и прямолинейного движения системы, в которой они происходят. В частности, отсюда вытекало, что измерения скорости света на Земле, независимо от направления луча, должны дать один и тот же результат, что как раз совпадало с результатом знаменитого опыта Майкельсона (1881 г.), обнаружившего постоянство скорости света во всех направлениях как по направлению, так и против движения Земли. Однако опыты Физо (1851 г.), подтвердившие гипотезу Френеля о частичном увлечении эфира, противоречили теории Герца. Теория Герца вскоре уступила место электродинамике движущихся тел Г. А. Лоренца, которую затем сменила специальная теория относительности Эйнштейна (1905 г.).

Кроме области электромагнитных явлений, другой важной областью научной деятельности Герца была механика.

В механике Герц явился одним из крупнейших представителей так называемого кинетического направления, или «механики без силы».

В отличие от ньютоновой, динамической механики сторонники «механики без силы» считали возможным объяснить все явления природы взаимодействием движущихся весомых масс при их соприкосновении, без введения понятия «силы». На основании этих представлений Герц еще в 1881 году впервые дал полную теорию удара упругих твердых тел (шаров), рассчитал время соударения упругих шаров и ввел строгое понятие твердого тела.

В своем труде «Принципы механики» [1], опубликованном в 1894 году, Герц обобщил результаты многих работ по «механике без силы» (Максвелл, У. Томсон, Дж. Томсон и др.).

Основными понятиями в механике Герца были время, пространство и масса; основным механическим законом — установленный Герцем принцип кратчайшего пути (видоизмененный закон инерции): всякая свободная система сохраняет состояние покоя или равномерного движения по кратчайшей траектории. Все явления объяснялись взаимодействием движущихся масс при их контакте.

---

[1] На русский язык полностью не переведен.

Однако, стремясь устранить понятия «силы», «потенциальной энергии» как не имеющие конкретного физического содержания, Герц вынужден был ввести понятия гипотетических «скрытых движений», «скрытых масс», которые по существу тоже не имели конкретного физического содержания, а потому и не делали механику более «материалистической». «Механика без силы» не нашла применения в современной физике, развитие которой показало бо́льшую приемлемость ньютоновой механики для решения конкретных задач.

ТРУДЫ Г. Р. ГЕРЦА

К 50-летию открытия герцовых волн Отделение технических наук Академии наук СССР выпустило сборник:

50 лет волн Герца. М.—Л., Акад. наук СССР, 1938, 156 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Отд-ние техн. наук. Классики естествознания).

Работы Герца в сборнике: О весьма быстрых электрических колебаниях (стр. 45—75).— Об электродинамических волнах в воздухе и об их отражении (стр. 76—91).— Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла (стр. 92—119).— О лучах электрической силы (стр. 120—135).— О действии ультрафиолетового света на разряд электричества (стр. 136—165).

Первая и последняя из этих работ появились на русском языке в 1910—1911 гг. в сборнике «Электрические колебания и волны» (вып. 2 и 6).

50 лет радио. 1895—1945. Вып. 1. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 112—202.

В раздел «Генрих Рудольф Герц» вошли следующие его работы: Исследования по распространению электрической силы. Вводный обзор (стр. 112—130).— О весьма быстрых электрических колебаниях (стр. 131—148).— Из работы г-на В. фон Бецольде Исследование электрических разрядов. Предварительное сообщение (стр. 149—155).— Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении (стр. 156—165).— Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла (стр. 166—182).— О лучах электрической силы (стр. 183—192).— О соотношениях между светом и электричеством (стр. 193—202). Доклад, прочитанный на 62-м собрании немецких естествоиспытателей и врачей в Гейдельберге в 1889 г.

Герц Г. Предисловие к механике. Пер. Г. Котляра, просмотр. С. Т. Конобеевским.— В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физика. Под ред. проф. А. К. Тимирязева. Вып. 2. М.—Л., Госиздат, 1924, стр. 41—78.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ ГЕНРИХА РУДОЛЬФА ГЕРЦА

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии.— Сочинения. Т. 14, стр. 209, 224, 270—271, 284.

В. И. Ленин говорит о Герце как о знаменитом естествоиспытателе, хотя и непоследовательном материалисте. Однако В. И. Ленин решительно выступает против попыток идеалистов «...завербовать себе в союзники» Герца. Анализируя труды ученого, он показывает, что «...Герцу даже и не приходит в голову возможность нематериалистического взгляда на энергию».

Герц Генрих Рудольф (1857—1894).— БСЭ, 2-е изд., т. 11, 1954, стр. 147—148, портр.

Гельмгольц Г. Жизнь и труды Генриха Герца.— «Вестник опытной физики и элемент. математики», 1906, № 410, стр. 25—35.

Очерк написан Гельмгольцем под свежим впечатлением преждевременной смерти Герца — одного из самых близких ему и самых одаренных его учеников. Гельмгольц говорит о полном обаяния творческом облике Герца — ученого и человека, о проблемах физики (электродинамика, механика), разработке которых Герц отдал всю свою недолгую жизнь, о выдающихся его открытиях, затмивших «все то, чего достигли в течение всего столетия самые талантливые из его товарищей».

Хвольсон О. Д. Опыты Герца и их значение. Популярное изложение. Отд. оттиск из журн. «Электричество». Спб., К. Л. Риккер, 1890. 82 стр.

Несколько извлечений из этой работы напечатано в кн.: 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 1. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 411—415.

Лодж О. Творение Герца.— В кн.: 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 1. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 424—445.

Лекция, прочитанная в Лондонском королевском обществе в июне 1894 года. Краткое введение посвящено памяти Герца. Далее излагается ход его работ, приведших к открытию электромагнитных волн. Ясность изложения делает лекцию доступной для широких кругов читателей, несмотря на всю сложность затронутых в ней вопросов.

ЮБИЛЕЙНЫЕ СТАТЬИ И МАТЕРИАЛЫ

Бачинский А. П. Генрих Герц.— (К пятидесятилетию со времени открытия и исследования электромагнитных волн).— «Физика в школе», 1938, № 5—6, стр. 1—3.

Аркадьев В. К. 50 лет открытия волн Герца.— «Вестник Акад. наук СССР», 1939, № 4—5, стр. 98—101.

Радовский М. И. Генрих Герц.— «Электричество», 1939, № 5, стр. 45—46.

Малов Н. Н. Генрих Герц.— «Успехи физ. наук», 1938, т. 19, вып. 4. стр. 553—558.

Кляцкин И. Г. Генрих Герц и современная радиотехника.— В кн.: 50 лет волн Герца. М.—Л., Акад. наук СССР, 1938, стр. 31—40.

Статья перепечатана в журнале «Электричество», 1939, № 6, стр. 48—52.

Котов Ф. В. Механика Герца.— «Ученые записки Моск. гос. ун-та», 1937, № 7, стр. 201—256.

В статье приводится обзор работ предшественников Герца и детальный анализ принципов его механики.

Аркадьев В. К. Работы Герца, их значение и дальнейшее развитие.— В кн.: 50 лет волн Герца. М.—Л., Акад. наук СССР, 1938, стр. 9—30.

Статья состоит из двух частей. В первой излагается ход работ Герца, во второй — говорится о влиянии этих работ на развитие теории Максвелла и физики в целом. Касаясь, в частности, развития теории электромагнитной спектроскопии, автор перечисляет ряд работ советских физиков, отмечая, что достижения в этой области созданы «в значительной мере в свете данных, полученных при помощи исследования вещества в волнах Герца».

* * *

100 лет со дня рождения Герца.— «Вестник Акад. наук СССР», 1957, № 5, стр. 116—118.

Соломонов М. С. Памяти Генриха Герца.— (К столетию со дня рождения).— «Известия Акад. наук СССР. Отд-ние техн. наук», 1957, № 1, стр. 174—176.

Обе статьи представляют собой краткий отчет о юбилейном заседании 27 февраля 1957 года, на котором были представлены Физический институт имени П. Н. Лебедева, Институт радиотехники и электроники, Институт истории естествознания и техники Академии наук СССР, Радносовет Академии наук СССР и другие научные и общественные организации.

Введенский Б. А. Генрих Герц.— «Вопросы истории естествознания и техники», 1957, вып. 5, стр. 3—8, портр. То же (под назв.: К столетию со дня рождения Генриха-Рудольфа Герца).— «Вестник истории мировой культуры», 1957, № 3, стр. 57—62.

Вступительная речь на юбилейном заседании 27 февраля 1957 г.

Аренберг А. Г. Генрих Герц и электромагнитные волны.— «Вопросы истории естествознания и техники», 1957, вып. 5, стр. 9—18.

Доклад на юбилейном заседании 27 февраля 1957 г.

Соминский М. С. Генрих Герц. (К 100-летию со дня рождения).— «Физика в школе», 1957, № 2, стр. 22—26, портр.

Соминский М. С. Знаменитый немецкий физик. (К 100-летию со дня рождения Генриха Герца).— «Природа», 1957, № 4. стр. 70—77.

Таранцев А. Генрих Рудольф Герц. (К 100-летию со дня рождения).— «Радио», 1957, № 2, стр. 14—15.

Кляцкин И. Г. Генрих Герц. К 100-летию со дня рождения.— «Электричество», 1957, № 3, стр. 70—73.

Кляцкин И. Г. Генрих Герц. (1857—1894). — «Радиотехника», 1957. № 2, стр. 3—9.

Малов Н. И. Генрих-Рудольф Герц. (К 100-летию со дня рождения).— «Радиотехника и электроника», 1957, т. 2, вып. 2, стр. 131—135.

Все эти статьи и по форме и по содержанию весьма однородны. Во всех приводятся важнейшие факты из биографии Герца, кратко раскрывается содержание его научной деятельности, определяется место Герца в истории науки и техники.

Аренберг А. Г. Генрих Герц (1857—1894). М., «Знание», 1957. 22 стр. (Всесоюз. о-во по распространению полит. и науч. знаний).

Популярный очерк жизни и деятельности.

Гуков В. И. Генрих Герц.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 17, стр. 498—508.

Значительное внимание в этой статье уделено работам Герца в области механики и его философским взглядам.

Григорьян А. Т. и **Полак Л. С.** Основные идеи механики Генриха Герца.— «Вопросы истории естествознания и техники», 1957, вып. 5, стр. 19—30.

Разбор книги Г. Герца «Принципы механики, изложенные в новой связи» (1910).

* * *

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 203—226.

Лакур П. и **Аппель Я.** Историческая физика. Т. 2, стр. 378.

Лауэ М. История физики, стр. 64—66 и др. (см. именной указатель).

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я. и **Шнейберг Я. А.** История техники, стр. 350, 435—436, 440, 445.

МАКС ПЛАНК

(1858—1947)

Выдающийся немецкий физик-теоретик, один из основоположников квантовой физики Макс-Карл-Эрнст-Людвиг Планк родился 23 апреля 1858 года в г. Киле. Отец и дед его были профессорами германских университетов. Планк учился в Мюнхене (1874—1877), затем в Берлине (1877—1878), где слушал лекции знаменитых немецких физиков Гельмгольца и Кирхгофа.

По окончании Берлинского университета Планк был некоторое время приват-доцентом при кафедре теоретической физики в Мюнхенском университете, затем с 1885 года — профессором в Киле. В 1889 году он по рекомендации Гельмгольца возглавил кафедру теоретической физики в Берлинском университете, заняв место умершего Кирхгофа.

С 1894 года Планк был членом Берлинской академии наук, а позднее и непременным ее секретарем.

В 1918 году ему была присуждена Нобелевская премия по физике.

В первый период своего научного творчества (1879—1896) Планк занимался разработкой основных проблем термодинамики. В 1879 году он защитил докторскую диссертацию, посвященную обоснованию второго начала и применению термодинамики к решению ряда конкретных задач из области физики и химии. Исходя из термодинамических принципов, Планк провел в эти же годы ряд физико-химических исследований, в результате которых им была разработана теория слабых растворов и теория диссоциации (к этой теории он пришел одновременно со шведским физиком Сванте Аррениусом).

В 1887 году появилась монография Планка «Принцип сохранения энергии», в которой он проанализировал и во многом уточнил само понятие энергии. Это сочинение было удостоено премии Геттингенского университета.



Макс Планк

В 90-е годы Планк начинает свои основные исследования — разработку термодинамической теории теплового излучения.

Проблема теплового излучения была одной из наиболее злободневных и трудных в физике конца XIX века. Установление Кирхгофом (1859 г.) основного закона равновесного излучения нагретых тел показало, что тепловое излучение любого тела, независимо от его природы, характеризуется одной, универсальной функцией длины волны и температуры (см. очерк о Кирхгофе).

Все многочисленные попытки найти, исходя из представлений классической физики, конкретное выражение для этой функции не удавались Более того, они привели физиков (Рэлей, 1900 г.; позже Джинс, Г. А. Лоренц) к парадоксальному выводу: нагретое тело, независимо от температуры, должно излучать бесконечно бо́льшую энергию в ультрафиолетовой части спектра [1], что, конечно, противоречило опыту. Классическая физика оказывалась не в состоянии объяснить температурное излучение тела.

Эту задачу решил Планк, который внес коренные изменения в представления об излучении энергии телами.

В 1900 году Планку полуэмпирическим путем впервые удалось найти универсальную формулу распределения энергии, охватывающую весь спектр излучения абсолютно черного тела и поразительно совпадавшую с результатами опыта (опубликовано в работе «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре»).

Эта формула, однако, представляла собою вначале, по словам самого Планка, лишь «...удачно подобранное интерполяционное выражение» [2]. Планк поставил перед собою цель «...сообщить ей реальное физическое значение», обосновать найденный закон теоретически. Поиски решения привели его к гениальному открытию. Впоследствии он писал об этом: «...после нескольких недель наиболее напряженной за всю мою жизнь работы потемки прояснились, и передо мною забрезжил свет новых идей» [3].

Планк построил теоретическую модель излучающего абсолютно черного тела в виде огромного числа элементарных источников электромагнитных волн — осцилляторов, излучающих и поглощающих волны всевозможных длин (длина волны определяется частотой колебаний осциллятора). Применив к этой модели основы термодинамики и статистику Больцмана, Планк рассмотрел случай равновесного излучения такой системы осцилляторов, когда полная энергия системы не меняется. Энергия же отдельного осциллятора может при этом многократно изменяться и, как предположил вначале Планк, принимать любые значения.

Однако исследования этой модели привели его к такой формуле распределения энергии, которая явно противоречила опыту. Тогда-то перед ним и «забрезжил свет новых идей». Планк сделал смелое предположение: энергия осциллятора не может принимать любые значения; осциллятор излучает и поглощает энергию лишь определенными порциями, всег-

---

[1] Вывод, получивший в физике название «ультрафиолетовой катастрофы».

[2] Планк М. Физические очерки. М., Госиздат, 1925, стр. 125.

[3] Там же.

да целыми кратными некоторой наименьшей порции, как бы «атому энергии», зависящему только от рассматриваемой группы осцилляторов, т. е. от частоты или длины волны. Такую наименьшую порцию энергии Планк назвал квантом энергии (от лат. quantum — количество). Сравнивая свои результаты с ранее открытым законом смещения Вина, Планк пришел к выводу, что квант энергии в точности пропорционален частоте излучения, т. е. равен произведению частоты на некоторую постоянную величину, обозначенную Планком через «h» и получившую впоследствии наименование «постоянной Планка», или «кванта действия», как назвал ее Планк. Таким образом, квант энергии имеет тем большую величину, чем больше частота (или меньше длина волны) излучаемой (поглощаемой) энергии.

Важно отметить, что, как выяснил Планк, природа самих осцилляторов в теоретической модели Планка (у него это были колеблющиеся электроны) совершенно не влияет на окончательные выводы. Поэтому гипотеза Планка оказалась вполне применимой и к излучающим атомам и молекулам, хотя в то время механизм излучения атомами и молекулами не был еще окончательно изучен.

В пользу гипотезы о квантах говорило то исключительно полное количественное совпадение, которое получалось между вычисленным по формуле Планка распределением энергии в спектре абсолютно черного тела и распределением, полученным в многочисленных экспериментах при различных температурах излучающего тела и в различных участках спектра.

Открытие Планка в корне изменяло основные представления классической физики об энергии, впервые внося представление о ее прерывности.

День 14 декабря 1900 года, когда Планк сообщил на заседании Берлинского физического общества о своем открытии, стал днем рождения новой обширной области физики — квантовой физики. Развитие гипотезы Планка привело Эйнштейна (1905 г.) к открытию двойственной — волновой и корпускулярной одновременно — природы света; на основе этих представлений Эйнштейн дал исчерпывающе полное объяснение явления фотоэффекта, а также ряда других явлений (правило Стокса в явлении люминесценции, ионизация газов).

Блестящим доказательством правильности гипотезы квантов явились работы знаменитого датского физика Нильса Бора по теории атома (1913 г.). Использовав в этой теории представления о квантах энергии и квантах действия, Бор усовершенствовал планетарную модель атома Резерфорда введением своих знаменитых постулатов (см. очерк о Резерфорде) и создал новую модель атома (Резерфорда—Бора), которая легла в основу современной ядерной физики. С помощью этой модели атома Бор впервые объяснил происхождение и теоретически рассчитал частоту (длину волны) линий в спектре атома водорода и ионизованного гелия.

В дальнейшем гипотеза квантов получила не менее убедительное подтверждение в работах Зоммерфельда, впервые объяснившего в 1916 году на основе этой гипотезы тонкую структуру спектров водорода и гелия. Это открытие Планк сравнивал со знаменитым открытием, также на основе теоретических расчетов, планеты Нептун [1].

[1] Планк М. Физические очерки. М., 1925, стр. 131.

В 1925 году голландский физик Г. А. Лоренц писал: «Теория квантов... сыграла совершенно исключительную роль в преобразовании физики, так как она повела к атомистике энергии и углубила взгляды на значение прерывности в явлениях природы. Постепенно она завоевывала все более широкие области. Это именно она раскрыла тайну строения атома и дала ключ к пониманию языка спектров» [1].

Дальнейшее развитие науки выявило универсальность квантового характера процессов в микромире — мире атомов, молекул, элементарных частиц. Был вскрыт глубокий физический смысл и постоянной Планка «h». Эта величина входит в основные формулы, связывающие корпускулярные и волновые свойства микрообъектов и выражающие законы их движения.

В настоящее время квантовая физика — квантовая механика, квантовая электродинамика — стали ведущими областями атомной физики, ядерной физики, физики элементарных частиц. Важной областью химии стала квантовая химия.

Значительное место в творчестве Планка занимают вопросы философии науки и общей теории познания. Наиболее полно философские взгляды Планка отражены в его замечательных публичных лекциях по различным проблемам физики и философии физики, изданных на русском языке в 1925 году под общим названием «Физические очерки». Планк выступает в них в основном с материалистических позиций. Он решительно критикует немецкого физика Маха, который утверждал, что все наши знания представляют собою не отражение в какой бы то ни было мере реальной действительности, а лишь наши собственные, субъективные ощущения. В противоположность Маху Планк исходит из убеждения, что вне и независимо от нашего сознания существует реальный мир, который с развитием науки познается человеком все глубже, так что относительность наших знаний носит временный характер и сама непрерывно меняется. Планк вскрывает и исторические корни махизма, явившегося, по его мнению, реакцией на те непреодолимые трудности, к которым пришла в конце XIX века механистическая физика, когда попытки свести все явления к механическим движениям потерпели крах. После 1900 года Планк в течение многих лет пытался объединить классическую и квантовую физику, но эти попытки оказались безуспешными.

Умер Макс Планк 4 октября 1947 года.

ТРУДЫ М. ПЛАНКА

Планк М. Принцип сохранения энергии. Пер. с 4-го нем. изд. С. Г. Суворова и Р. Я. Штейнмана. Со вступит. статьей С. Г. Суворова. М.—Л., ОНТИ. Ред. техн.-теорет. лит., 1938. 235 стр.

---

[1] Лоренц Г. А. Макс Планк и теория квантов. — «Успехи физ. наук», 1926, т. 6, вып. 2, стр. 81.

Планк М. Единство физической картины мира.— Теория физического познания Эрнста Маха. Возражение.— В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физика. Под ред. А. К. Тимирязева. Вып. 2. М.—Л., Госиздат, 1924, стр. 8—40.

«Единство физической картины мира» представляет собою доклад, прочитанный Планком в 1908 году в собрании студенческой корпорации Лейденского университета. Вторая статья написана в 1910 году. Продолжая полемику с Э. Махом, Планк подвергает резкой критике его идеалистическое мировоззрение в целом и отдельные его работы по физике.

Планк М. Энергия и температура.— «Физическое обозрение», 1912. т. 13, № 3, стр. 129—144.

Речь на заседании Французского физического общества (апрель 1911 г.).

Планк М. Физические очерки. Пер. с нем. Л. Я. Штрума. М., Госиздат, 1925. 136 стр. (Природа и культура. Кн. 12).

Содержание: Единство физической картины мира. Доклад, прочитанный в собрании естественнонаучного факультета студенческой корпорации Лейденского университета в 1908 году.— Отношение новейшей физики к механистическому мировоззрению. Доклад, прочитанный на 82-м съезде немецких естествоиспытателей и врачей в Кенигсберге в 1910 году.—Новые пути физического познания. Речь, произнесенная при вступлении в должность ректора Берлинского университета в 1913 году.— Динамическая и статистическая закономерность. Речь, произнесенная в 1914 году на торжественном заседании Берлинского университета по случаю столетнего юбилея со дня его основания.— Принцип наименьшего действия.— Взаимоотношение физических теорий. Опубликовано в 1915 году.— О природе света. Доклад, прочитанный в общем собрании Общества императора Вильгельма в 1919 году.— Возникновение и развитие теории квантов. Нобелевская лекция, прочитанная в заседании Шведской академии наук в Стокгольме в 1920 году.

Планк М. О причинности.— «Под знаменем марксизма», 1930, № 1, стр. 175—177.

Речь на заседании Прусской Академии наук 4 июня 1929 года.

Планк М. Термодинамика. Пер. с нем. А. Н. Фрумкина. Л.—М., Гос. изд., 1925. 311 стр.

Планк М. Теория теплового излучения. Пер. с 5-го нем. изд. М. Г. Черниховского и С. В. Вонсовского. Под ред. М. А. Ельяшевича. Л.—М., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 204 стр.

Планк М. Введение в теоретическую физику. Пер с нем. под ред. проф. Н. П. Кастерина. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1932—1935.

Ч. 1. Общая механика. Изд. 2-е. 1932. 199 стр., черт.

Ч. 2. Механика деформируемых тел. Изд. 2-е. 1932. 184 стр.

Ч. 3. Теория электричества и магнетизма. Изд. 2-е. 1934. 183 стр.

Ч. 4. Оптика. Пер. с нем. С. И. Лейтмана. 1934. 164 стр., черт.

Ч. 5. Теория теплоты. Пер. с нем. П. Н. Успенского. 1935. 228 стр.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ М. ПЛАНКА

Планк, Макс-Карл-Эрнст-Людвиг (1858—1947).— БСЭ, 2-е изд., т. 33, 1955, стр. 176—177, портр.

Блох М. А. Творец теории квант Макс Планк. (Биографический очерк).— «Вестник знания»., 1926, № 17. стлб. 1109—1114, портр.

Блох М. А. Макс Планк. (К 25-летнему юбилею гипотезы квантов).— «Природа», 1926, № 3—4, стлб. 3—10, портр.

Краткий очерк жизни и научного творчества Планка. Воспоминания о встречах автора с Планком в Ленинграде во время юбилейных торжеств Академии наук СССР в 1925 году.

Лоренц Г. А. Макс Планк и теория квантов.— «Успехи физ. наук», 1926, т. 6, № 2, стр. 81—92.

Максимов А. А. Планк и его борьба с физическим идеализмом. — «Под знаменем марксизма», 1930, № 1, стр. 165—172.

* *
*

Яворский Б. М. Макс Планк. (К столетию со дня рождения). — «Физика в школе», 1958, № 3, стр. 92—96, портр.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 96—97, 123—124, 106—107, 335—339 и др. (см. именной указатель).

Многочисленные упоминания о научной и педагогической деятельности М. Планка читатель найдет в книге:

Лауэ М. История физики (см. именной указатель).

ПЬЕР КЮРИ (1859—1906)

МАРИЯ СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ (1867—1934)

С именами выдающихся французских ученых Пьера Кюри и Марии Склодовской-Кюри непосредственно связаны первые и важнейшие исследования явления самопроизвольной радиоактивности. Изучая это явление, Пьер и Мария Кюри пришли к новым крупнейшим открытиям. Их труды положили начало новой главе физики — учению о радиоактивности, дальнейшее развитие которого позволило проникнуть в глубины атома и поставить на службу человеку невиданную по своей мощи энергию атомного ядра.

Пьер Кюри родился 15 мая 1859 года в Париже в семье врача — широко образованного человека прогрессивных убеждений.

Уже в ранние годы проявились большие способности П. Кюри к математике и физике. С 19 лет он стал работать в Парижском университете в качестве ассистента. С 1883 года и в течение последующих 22 лет Кюри был сначала преподавателем, а затем профессором Высшей технической физико-химической школы Парижа, где пользовался исключительной любовью и уважением своих учеников. Дорога на университетскую кафедру для него, как не окончившего какого-либо высшего учебного заведения во Франции, была закрыта, и, несмотря на свои огромные научные заслуги, он только в 1904 году, за два года до своей смерти, был, наконец, назначен профессором кафедры физики, специально для него учрежденной в Парижском университете. Лишь в 1905 году Кюри был избран в члены Парижской академии наук. Гениальный ученый, прославивший отечественную науку далеко за пределами Франции, Пьер Кюри работал на родине в крайне тяжелых условиях. До конца своей жизни он так и не имел в своем распоряжении физической лаборатории и все свои экспериментальные исследования вынужден был проводить в подсобных помещениях, вплоть до прохода между лестницей и аудиторией для студентов, а свои основные работы по радиоактивности М. и П. Кюри провели в старом сарае во дворе Физико-химической школы.

Мария Склодовская, ставшая в 1895 году женой Пьера Кюри, была дочерью учителя и так же, как и Пьер Кюри, испытала на себе большое и благотворное влияние своего отца.

Она родилась в Варшаве 7 ноября 1867 года. Блестяще окончив в 1883 году гимназию, Мария вынуждена была зарабатывать себе средства на жизнь, работая частной учительницей, и одновременно занималась самообразованием. Лишь в 1891 году ей удалось поступить в Парижский университет. Студенческие годы Марии Склодовской были также сопряжены с крайними материальными лишениями. Только беззаветная любовь к науке делала ее жизнь в маленькой чердачной комнатке светлой и полной замечательных надежд.

Научные исследования Пьера и Марии Кюри сначала шли разными путями. Пьер Кюри вместе со своим старшим братом — минералогом Жаком Кюри — занимался исследованием кристаллов. В 1880 году они открыли и количественно исследовали явление пьезоэлектричества (явление возникновения электрического заряда на некоторых кристаллах, например на кварце, при их механическом сжатии и растяжении).

Путем очень тонких опытов братья Кюри доказали существование и обратного эффекта — возникновения механической упругой деформации кристалла при сообщении ему электрического заряда. В результате этих работ П. и Ж. Кюри сконструировали высокочувствительный прибор для измерения в абсолютных единицах с помощью пьезоэффекта небольших количеств электричества и слабых токов. Эти работы братьев Кюри были удостоены премии имени известного французского физика Г. Р. Планте.

В 1884—1885 гг. Пьер Кюри разработал теорию образования кристаллов в виде правильных геометрических фигур, в частности исследовал законы симметрии в кристаллах. Большой интерес к кристаллофизике сохранился у него на всю жизнь.

Вторым циклом работ Пьера Кюри были его замечательные исследования (1891—1895 гг.) магнитных свойств различных веществ в широком диапазоне температур (от комнатной до 1400° С). Кюри установил, что для диамагнетиков магнитная восприимчивость не зависит от температуры. Для слабых парамагнетиков он открыл закон обратно пропорциональной зависимости между их магнитной восприимчивостью и абсолютной температурой (закон Кюри). Исследуя один из наиболее сильных ферромагнетиков — железо, Кюри обнаружил существование температуры (так называемая «точка Кюри»), выше которой ферромагнитные тела теряют свои характерные свойства и становятся близкими к парамагнетикам. Кюри обнаружил также, что при температуре выше «точки Кюри» скачкообразно изменяются и другие свойства вещества — теплоемкость, коэффициент теплового расширения, удельная электропроводность. Теоретически существование «точки Кюри» обосновал ученик Пьера Кюри Поль Ланжевен. Исследования по магнетизму явились темой докторской диссертации Кюри (1895 г.). Использовав магнитные свойства вещества, Кюри сконструировал очень точные, так называемые апериодические весы, применяемые в настоящее время в аналитической химии.

Мария Склодовская-Кюри после окончания Парижского университета



Пьер Кюри



Мария Склодовская-Кюри

начала в 1895 году свои научные исследования в той же скромной лаборатории Физико-химической школы, где работал и Пьер Кюри.

Первое время она занималась исследованием магнитных свойств закаленных сталей; результаты исследований были опубликованы ею в 1897 году.

Известие об открытии Беккереля вызвало у Марии Кюри живейший интерес, и с 1897 года исследования радиоактивности (название дано М. Кюри) и радиоактивных веществ стали делом всей дальнейшей жизни не только Марии, но и присоединившегося вскоре к ее работам Пьера Кюри.

Уже в 1897 году М. Кюри установила, что радиоактивные свойства соединений урана определяются исключительно количеством чистого урана в них, т. е. что радиоактивность является свойством атомов урана. В поисках новых радиоактивных веществ она обнаружила (одновременно с немецким физиком Г. К. Шмидтом) радиоактивные свойства у тория (сообщение об этом было опубликовано ею в 1898 г.). Дальнейшие настойчивые совместные исследования Пьера и Марии Кюри, связанные с переработкой тысяч килограммов смоляной урановой руды, привели их к открытию двух новых радиоактивных химических элементов — полония (июль 1898 г.) и радия (декабрь 1898 г., совместно с Ж. Бемоном)[1]. Радий оказался наиболее радиоактивным (в 1 000 000 раз более, чем уран), но исключительно редким на Земле элементом (на 1 *т* урана приходится всего 0,3 *г* радия).

С открытием радия возможности исследования радиоактивности резко возросли. Уже в 1899—1900 гг. в работах М. и П. Кюри, а также, независимо от них, в работах Резерфорда и Содди был установлен состав излучения радия (альфа- и бета-лучи, а вскоре и открытые Виллардом гамма-лучи). В 1900 году Мария Кюри впервые высказала мысль, что процесс излучения радия представляет собой самопроизвольный распад атомов радия, в результате чего радий превращается в чрезвычайно радиоактивное вещество — эманацию радия. Именно ее присутствию, как вскоре выяснилось, радий и обязан в основном своей высокой активностью[2].

В период с 1901 по 1903 гг. М. и П. Кюри исключительно точными физико-химическими методами, разработанными М. Кюри, всесторонне исследовали излучение радиоактивных веществ (в основном различных соединений радия). Наиболее важным результатом этих исследований было установление Пьером Кюри в 1903 году количественного закона спадания радиоактивности, согласно которому излучение любого количества радиоактивного вещества ослабевает вдвое (т. е. половина имеющегося количества радиоактивного элемента распадается) в строго определенный для данного элемента промежуток времени — так называемый период полураспада. Для урана период полураспада — несколько миллиардов

---

[1] Один из преподавателей Физико-химической школы в то время.

[2] Эта гипотеза была высказана также Резерфордом, который совместно со своим учеником Ф. Содди одновременно и независимо от П. и М. Кюри вел исследования по радиоактивности.

лет, для радия — 1 600 лет, эманации радия — около 4 дней и т. д. М. и П. Кюри доказали полную независимость полупериода радиоактивного распада от каких бы то ни было внешних причин. На этом основании Пьер Кюри высказал мысль о возможности определять большие промежутки времени, пользуясь периодом полураспада как эталоном времени. Эта идея действительно нашла применение в геологии и в космогонии.

В том же 1903 году Пьер Кюри (в сотрудничестве с А. Лабордом) сделал величайшей важности открытие — обнаружил самопроизвольное и непрерывное выделение тепла солями радия, весьма заметное даже при тех ничтожных количествах радия, которые содержались в исследуемых минералах. Это открытие было первым вестником новой эпохи — века атомной энергетики.

Кроме исследований (совместно с Пьером Кюри) радиоактивности, Мария Кюри одновременно работала над выделением в чистом виде химического элемента радия, который со времени его открытия был известен лишь в виде составных частей сложных химических соединений и обнаруживал себя только благодаря излучению. В 1902 году ей удалось получить 0,1 *г* простого химического соединения — хлорида радия, в состав которого, кроме радия, входил только хлор. Это открытие и связанные с ним исследования (прежде всего определение атомного веса радия), впервые доказавшие реальность нового химического элемента, стали темой докторской диссертации, которую Мария Кюри блестяще защитила в 1903 году.

Исследования П. и М. Кюри по радиоактивности были удостоены в 1903 году Нобелевской премии по физике, которую они получили вместе с Беккерелем.

В том же году Лондонское королевское общество наградило П. и М. Кюри золотой медалью Дэви.

Супруги Кюри отказались извлечь какие бы то ни было материальные выгоды из своего открытия. Они не взяли патента на открытие радия и безвозмездно передали всю научную и техническую документацию, связанную с его получением, как французским, так иностранным ученым и промышленникам, которые заинтересовались новым элементом, обнаружившим к тому времени, в частности, свои целебные свойства. В 900-е годы, по инициативе П. и М. Кюри, в Париже были сделаны первые попытки промышленного получения радия (в виде соединений).

После трагической гибели Пьера Кюри (19 апреля 1906 г.) Мария Кюри заняла его место на кафедре Парижского университета и впервые начала читать курс по радиоактивности. Она была первой во Франции женщиной-профессором, как и первой в мире женщиной-лауреатом Нобелевской премии. Продолжая научные исследования, М. Кюри в 1910 году пришла к новому замечательному открытию — она получила (совместно с французским химиком А. Дебьерном) радий в металлическом виде и вторично, с большей точностью, определила его атомный вес. В 1911 году она впервые изготовила эталон (контрольный образец) радия, который в течение 24 лет оставался единственным в мире.

Склодовская-Кюри М. Радий и радиоактивность. Полный пер. с 2-го франц. изд. А. И. Бачинского. М., «Творческая мысль», 1905. 106 стр.

Кюри М. Открытие радия. Речь, произнесенная при получении Нобелевской премии по химии 11 декабря 1911 г. в Стокгольме. Спб., 1912. 40 стр. с илл. и портр.

Склодовская-Кюри М. Эталон радия и измерения в области радиоактивности. Пер. с франц. Н. Тамамшевой. Под ред. проф. Н. А. Булгакова. Спб., «Физика», 1913. 63 стр.

Кюри М. Радий, радиоактивность и строение вещества. Сборник избр. статей. В честь великой исследовательницы. Под ред. и с предисл. проф. Н. А. Шилова. М.—Л., «Земля и фабрика», 1925. 143 стр. с портр. и илл.

В сборник вошли следующие работы М. Кюри: Открытие радия. Речь, произнесенная 11/XII 1911 года в Стокгольме при получении Нобелевской премии по химии — Эталон радия. — Радиоактивность и сходные с ней явления — Изотопия и изотопы.

Кюри М. Радиоактивность. Пер. с франц. З. В. Ершовой и В. Д. Никольского. Под ред. В. И. Баранова. М.—Л., Гостехиздат, 1947. 520 стр., илл.; 2 л. портр.

Классический курс, читанный автором в течение многих лет в Сорбонне и изменявшийся каждый год в соответствии с прогрессом науки.

Первое издание этой книги на русском языке вышло в Петербурге в 1912 г. (перевод М. Пирожкова).

Кюри П. Нобелевская речь, произнесенная Пьером Кюри в Стокгольме 6 июня 1905 г. перед Академией наук.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 161—169.

В примечаниях, составленных М. И. Радовским, приводятся извлечения из материалов Петербургской Академии наук об избрании М. Кюри членом-корреспондентом Академии.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ М. и П. КЮРИ

Склодовская-Кюри Мария (1867—1934).— БСЭ, 2-е изд., т. 39, 1956, стр. 239—240, портр.

Кюри Е. Жизнь Марии Кюри. Пер. А. Кулишер и Е. Шишмаревой. М.—Л., Детгиз, 1944. 128 стр., портр.

Замечательная биографическая повесть, написанная дочерью Марии Кюри — Евой Кюри. Под названием «Мадам Кюри» книга эта впервые появилась в Париже в 1938 году и выдержала во Франции 120 изданий. В русском переводе опубликованы лишь части этой биографии.

Кюри Е. Мари Кюри. Пер. с франц. Е. Шишмаревой.— «Интернац. лит.», 1940, № 5—6, стр. 228—275.

Отдельные главы из повести «Жизнь»» Марии Кюри.

Двадцати четырех лет Мария приезжает в Париж и поступает в Сорбонну. С исключительной выдержкой, отказывая себе во всем, Мария продолжает свои занятия. Каждую осень после каникул, проведенных дома, она не знает, хватит ли у нее средств, чтобы вернуться в Париж. В Сорбонне она проявляет блестящие способности и становится одной из самых талантливых студенток. В 1894 году Мария знакомится с Пьером Кюри, и с этого времени начинается история замечательного сотрудничества и творческой дружбы двух крупнейших ученых.

За получение в чистом виде элемента радия Марии Кюри в 1911 году была вторично присуждена Нобелевская премия — на этот раз по химии [1].

В 1908—1910 гг. М. Кюри опубликовала ряд фундаментальных трудов, подытоживавших многолетние исследования по радиоактивности — Пьера Кюри, их совместные и ее собственные, в частности ее важный труд по классификации радиоэлементов. По инициативе Марии Кюри в 1914 году в Париже был создан Радиевый институт. Здесь М. Кюри довела до совершенства свой количественный метод радиоактивных измерений: точность измерений, производимых в Радиевом институте Парижа, прославилась на весь мир. В лабораториях Радиевого института Мария Кюри подготовила целую плеяду исследователей в новой созданной ею области науки — радиохимии.

Мария Склодовская-Кюри имела почетную докторскую степень многих университетов мира и была членом многих иностранных академий наук, в том числе Академии наук СССР (членом-корреспондентом с 1907 и почетным членом — с 1926 г.). С 1923 года она состояла почетным директором созданного по ее инициативе Радиевого института в Варшаве. Еще в 1911 году М. Кюри была единственной женщиной-физиком, входившей в состав так называемого Сольвеевского международного института физики [2]. Однако она так и не была избрана в Парижскую академию наук, не решившуюся принять в число своих членов выдающуюся женщину-ученого, для которой Франция стала второй родиной.

Мария Кюри умерла 4 июля 1934 года, все свои силы и даже жизнь отдав науке.

Пьер и Мария Кюри вошли в историю мировой науки как замечательный пример единства дополнявших друг друга больших талантов, больших человеческих чувств, интересов, отношений. Их научная деятельность, как сказал в своей речи в Стокгольме при вручении Нобелевской премии Беккерелю и супругам Кюри президент Шведской академии наук Г. Р. Тернеблад, является «лучшей иллюстрацией древней поговорки: «Coniuncta valent» (сила в единстве).

ТРУДЫ М. и П. КЮРИ

Склодовская-Кюри М. Радий и радиоактивные вещества. Исследование радиоактивных веществ. Диссертация, представл. для получения степени доктора физики. Пер. со 2-го франц. изд. С. Н. Петрова. Под ред. проф. А. С. Попова. Спб., 1904. 127 стр. с илл.

Почти одновременно вышли два других издания этого труда.

Склодовская-Кюри М. Исследования над радиоактивными веществами. Пер. со 2-го франц. изд. П. М. Факторовича. Спб., К. Л. Риккер, 1904. 112 стр. с илл.

---

[1] Мария Кюри была и остается единственным человеком, дважды получившим Нобелевскую премию.

[2] Своеобразное научное учреждение, основанное в 1911 г. как свободное объединение крупных ученых — физиков.

Вот об этом периоде ее жизни и рассказывается в приведенных главах.

Отрывок из этой книги, в котором рассказано об открытии радия, опубликован под названием «Радий» в журнале «Техника — молодежи», 1944, № 12, стр. 11—13.

Кюри Е. «Мадам Кюри». Пер. с франц. И. Эрбург. — «Индустрия социализма», 1939, № 3, стр. 50—54, портр.

Несколько других отрывков из книги «Жизнь Марии Кюри».

Жолио-Кюри И. Жизнь и творчество Марии Склодовской-Кюри.— «Вопросы истории естествознания и техники [Акад. наук СССР]», 1957, вып. 3, стр. 39—49.

* *
*

По случаю 25-летия со дня открытия радия в большой аудитории Сорбонны, 26 декабря 1923 года, была произнесена речь:

Перрэн Ж. Мария Кюри и открытие радия.— В кн.: Кюри М. Радий, радиоактивность и строение вещества. М.—Л., «Земля и фабрика», 1925. стр. 13—26.

Жан Перрэн напомнил в своем выступлении о важнейших этапах того пути, который привел к открытию радия. Потребовались колоссальные усилия, чтобы получить это вещество в чистом виде. Если эти усилия и не были исключительно делом одной Марии Кюри, то были вызваны во всяком случае ее настойчивой и упорной волей. В заключительной части своей речи автор говорит о том времени, когда человечество станет властителем безграничных запасов энергии, которые таятся в недрах материи. Тогда-то «встанет во всем своем блеске великий образ той, которую мы сегодня чествуем, принося ей в дар нашу признательность, наши надежды и наши мечты».

* *
*

Блох М. А. Памяти М. Кюри-Склодовской— «Вестник знания», 1934, № 9, стр. 593—598.

Хлопин В. Г. Мария Склодовская-Кюри.—«Природа», 1935, № 1, стр. 89—91.

Краткий очерк жизни и деятельности одного из наиболее блестящих представителей научной мысли, открытия которого вызвали коренной переворот в наших основных представлениях не только в области физики и химии, но, как это лишь теперь выясняется, и в ряде других смежных с ними областей — геохимии, геологии и биологии».

Цетлин Л. С. Мария Кюри-Склодовская. (К 5-летию со дня смерти).— «Наука и жизнь», 1939, № 10, стр. 45—51, портр.

Общий очерк жизни и научного творчества.

Яффе Б. Мария Склодовская-Кюри. Пер. с англ. Л. К. Лепинь.— «Химия в школе», 1939, № 4, стр. 21—32.

В 1954 году польская научная общественность отметила 20-летие со дня смерти Марии Кюри. О сессии Польской академии наук можно прочесть в статье:

Чмутов К. В. Дни памяти Марии Склодовской-Кюри в Польше.— «Вестник Акад. наук СССР», 1955, № 1, стр. 66—68.

* *
*

Кюри Пьер (1859—1906).— БСЭ, 2-е изд., т. 24, 1953, стр. 180, портр.

Лучшей биографией Пьера Кюри является книга:

Кюри М. Пьер Кюри. Пер. С. А. Щукарева. Л., Науч. хим.-техн. изд. Науч. техн. отд. ВСНХ, 1924. 78 стр., портр.

Особая ценность этой биографии заключается в том, что она написана другом, спутником жизни и постоянным сотрудником Пьера Кюри. Подкупает глубокая правдивость книги. Биография заканчивается выдержками из воспоминаний Анри Пуанкаре, Жана Перрэна, Поля Ланжевена и др. о Пьере Кюри.

Кюри М. Пьер Кюри. (Жизнь и деятельность). М., «Огонек», 1926. 64 стр.

* *
*

В 1956 году по решению Всемирного Совета Мира во всех странах было отмечено 50-летие со дня смерти Пьера Кюри. Широко отметила эту памятную дату советская общественность. Было проведено торжественное заседание Академии наук СССР совместно с Советским Комитетом защиты мира и другими учреждениями и организациями, в журналах появился ряд статей.

50 лет со дня смерти Пьера Кюри.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 5, стр. 48—53.

Информация о торжественном совместном заседании Академии наук СССР, Советского Комитета защиты мира, Московского гос. университета и Всесоюзного общества культурной связи с заграницей 19 апреля 1956 года.

Несмеянов А. Н. Памяти Пьера Кюри.—«Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 7—9.

Вступительное слово на торжественном заседании 19 апреля 1956 г.

Дежан П. Пьер Кюри.—«Труды Ин-та истории естествознания и техники [Акад. наук СССР]», 1957, т. 19, стр. 10—12.

Выступление чрезвычайного и полномочного посла Франции в СССР на торжественном заседании 19 апреля 1956 г.

* *
*

Жолио-Кюри И. и **Жолио-Кюри Ф.** Пьер Кюри и пути развития современной науки. (Пер. с франц.).— «Вопросы истории естествознания и техники», 1956, вып. 1, стр. 5—8, портр.

Статья написана выдающимися французскими учеными по просьбе Института истории естествознания и техники Академии наук СССР и редакции журнала «Смена». В том же объеме статья опубликована в «Вестнике Академии наук СССР», 1956, № 5, стр. 54—57. С некоторыми сокращениями под заглавием «Великий физик» статья напечатана в журнале «Смена», 1956, № 8, стр. 15.

Иоффе А. Ф. Пьер Кюри — выдающийся французский физик. (К 50-летию со дня смерти).— «Природа», 1956, № 5, стр. 74—79.

Доклад, прочитанный акад. А. Ф. Иоффе на совместном заседании Академии наук СССР, Советского комитета защиты мира, Московского гос. университета имени М. В. Ломоносова и Всесоюзного общества культурной связи с заграницей, посвященном памяти Пьера Кюри 19 апреля 1956 года.

В несколько измененной редакции доклад напечатан: в «Вестнике Академии наук СССР», 1956, № 4, стр. 30—35 и в журнале «Успехи физических наук», 1956, т. 58, вып. 4, стр. 571—579.

Шпольский Э. В. Жизнь и деятельность Пьера Кюри (1859—1906).— «Успехи физ. наук», 1956, т. 58, вып. 4, стр. 581—598.

Пьер Кюри характеризуется в статье как выдающийся физик и кристаллограф, тонкий экспериментатор и глубокий мыслитель-гуманист.

Старосельская-Никитина О. А. Жизнь и творчество Пьера Кюри.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад наук СССР], 1957, т. 19, стр. 13—69.

Наиболее обстоятельная из новейших научных биографий Пьера Кюри.

Семенов А. Великий физик.— «Октябрь», 1956, № 4, стр. 152—158.

Соминский М. С. Пьер Кюри. (К 50-летию со дня смерти).— «Физика в школе», 1956, № 2, стр. 19—24, портр.

Кудрявцев П. С. Пьер Кюри. (К 50-летию со дня смерти).— «Наука и жизнь», 1956, № 4, стр. 57—58, портр.

Внимание во всех этих статьях концентрируется вокруг важнейших физических проблем, разработке которых была посвящена самоотверженная научная дятельность Пьера Кюри.

* *
*

Дорфман Я. Г. Вклад Пьера Кюри в науку о магнетизме.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 70—83.

Работам Пьера Кюри в области кристаллографии посвящены статьи:

Пьер Кюри. (К 50-летию со дня смерти).—«Кристаллография», 1956, т. 1, вып. 2, стр. 147—149.

Шафрановский И. И. Пьер Кюри — кристаллограф.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 84—94.

* *
*

Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2, стр. 300, 302, 375—384 и др. (см. именной указатель).

АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ

(1859—1906)

Александр Степанович Попов родился 16 марта 1859 года на Урале, в селе Турьинский Рудник (ныне Краснотурьинск) в семье священника. Среднее образование он получил в Перми в духовной семинарии — единственно доступном для него учебном заведении, где он мог обучаться бесплатно. Окончив его, Попов уехал в Петербург и поступил в 1877 году в университет на физико-математический факультет.

Электротехника — новая и многообещающая отрасль техники — особенно его заинтересовала. Еще в студенческие годы он принимал деятельное участие в работе вновь организованного электротехнического отдела Русского технического общества.

После окончания университета Попову было предложено остаться при университете для подготовки к званию профессора, но он предпочел принять другое предложение и в 1883 году занял должность преподавателя физики и высшей математики в Минном офицерском классе в Кронштадте. Это было одно из первых русских учебных заведений, где производилась серьезная подготовка в области электротехники, к тому времени уже получившей довольно широкое применение в военном деле.

Попов был замечательным педагогом и пользовался большим уважением слушателей. Помимо учебных лекций, он часто выступал в Кронштадте и Петербурге с публичными лекциями по различным вопросам физики, которые всегда собирали большое число слушателей.

Училище располагало прекрасно оборудованным, особенно в области электричества и магнетизма, физическим кабинетом, так что Попову представлялись здесь большие возможности и для научной деятельности, которой он отдавал все свободное от учебных занятий время.

Его научные интересы всегда были близки к практике, к технике. Одним из первых его научных исследований была разработка метода фотометрических наблюдений солнечной короны во время полного затмения 1887 года. Для этой цели он создал оригинальную конструкцию фотометра. Но основные интересы его концентрировались на электротехнике.



Александр Степанович Попов

А. С. Попову принадлежит бессмертная заслуга практического применения и блестящего завершения знаменитых исследований Герца по обнаружению и изучению электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом.

Опубликование результатов Герца (1889) не только убедило ученый мир в существовании электромагнитных волн но и дало в руки физиков первый искусственный источник этих волн —вибратор Герца, позволявший возбуждать электромагнитные волны и посылать их во всех направлениях. Однако далеко не все и не сразу поняли и оценили практические следствия опытов Герца. В числе первых был английский физик В. Крукс, который с уверенностью и большой проницательностью говорил о реальной возможности и грандиозных перспективах применения электромагнитных волн как средства беспроволочной связи. Одной из наиболее актуальных проблем в этом отношении, как указывал Крукс, было создание приемника электромагнитных сигналов, более чувствительного, чем резонатор Герца.

Поисками такого приемника в чисто научных целях занимались в конце XIX века многие физики. Наиболее близко к решению задачи подошли французский физик Э. Бранли и английский физик О. Лодж. Еще в первой половине XIX века было замечено влияние близких электрических разрядов на проводимость проводников, имеющих плохие контакты. Явление стало понятным после открытия электромагнитных волн: плохие контакты, подобно резонаторам Герца, «откликались» на электромагнитные волны.

Опираясь на эти факты, Бранли исследовал действие волн на проводимость, взяв в качестве проводника с большим сопротивлением стеклянную трубку, наполненную металлическим порошком. Он открыл замечательное свойство таких порошков под действием электромагнитных волн «спекаться», вследствие чего сопротивление их резко падало, а проводимость возрастала. Лодж усовершенствовал это приспособление, названное им «когерером», и нашел способ при помощи часового механизма встряхивать трубочку после каждого приема волны и таким образом восстанавливать сопротивление порошка.

Лодж наиболее близко подошел к изобретению радио. Но в его приемнике не хватало одной существенной части — антенны, без чего нельзя было добиться достаточной чувствительности и осуществить прием на далеких расстояниях. Впрочем ни Бранли, ни Лодж никогда не ставили перед собою такой цели.

Честь полного решения задачи беспроволочной телеграфии и, следовательно, честь изобретения радио принадлежит А. С. Попову.

Сразу же после опубликования работ Герца он занялся их глубоким изучением. Он широко пропагандировал опыты Герца в серии публичных лекций по физике. В это же время Попов начал поиски практического применения открытия Герца для осуществления беспроволочной связи на *дальние* расстояния.

В качестве источника Попов использовал прибор, подобный вибратору Герца. Основные же усилия он сосредоточил на разработке более чувствительного и с большей автоматичностью работающего приемника. Он

усовершенствовал когерер Бранли—Лоджа и применил в качестве «встряхивателя» порошка молоточек (подобный молоточку электрического звонка), включавшийся в цепь при помощи электромагнитного реле. В отличие от часового механизма, который либо не успевал восстанавливать сопротивление когерера к моменту прихода новой волны, либо встряхивал когерер слишком часто, реле замыкало цепь сразу же после приема каждого электромагнитного сигнала, обеспечивая этим высокую автоматичность работы приемника. С помощью такого приемника Попов к 1894 году осуществил связь на расстоянии в несколько метров — большем, чем в опытах его предшественников.

Но основной заслугой Попова и новым изобретением большого принципиального значения было изобретение им антенны. Уже в первых своих опытах 1894 года он заметил, что дальность действия приемника значительно возрастает, если к когереру присоединить длинную проволоку. К 1895 году Попов по этой схеме изготовил приемник, с помощью которого он и его сотрудник П. Н. Рыбкин впервые приняли сигналы, переданные с далекого (в несколько километров) расстояния самой природой — сигналы электрического разряда в атмосфере, говорившие о приближении грозы. Так совершился первый в мире прием «радиопередачи» — из атмосферы.

День 7 мая 1895 года, когда на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества А. С. Попов сообщил о своем изобретении и впервые демонстрировал свой приемник, принято считать днем рождения радио. Это сообщение Попова — «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» — было опубликовано в том же году в «Журнале Русского физико-химического общества». Приемник Попова, названный им «грозоотметчиком», сразу же нашел практическое применение в метеорологии: он позволял узнавать о приближении грозы на расстоянии до 30 *км*.

Настойчиво идя к своей основной цели — созданию беспроволочного телеграфа, Попов продолжал работу — теперь уже главным образом по усовершенствованию передатчика.

Окончательно проблема радиотелеграфии была решена им в начале 1896 года. 24 марта этого года состоялось историческое заседание Русского физико-химического общества, на котором Попов впервые продемонстрировал свой беспроволочный телеграф. На расстоянии около 250 *м* электромагнитными сигналами при помощи азбуки Морзе он передал первую радиограмму — слова «Heinrich Hertz» — в честь выдающегося физика, основоположника изучения электромагнитных волн.

Эта демонстрация была встречена бурными овациями, однако само изобретение не сразу получило широкую известность: лишь краткое сообщение о нем было опубликовано в «Журнале Русского физико-химического общества».

Попов принадлежал к тому типу ученых, которые с трудом и лишь под большим давлением извне берутся за перо, чтобы литературно оформить и опубликовать свои результаты. Разрешив одну задачу, они спешат дальше, теряя интерес к уже известному. Этим объясняется то, что Попов оставил чрезвычайно мало напечатанных работ. Правда, в данном случае

изобретение было слишком значительным, чтобы о нем молчать. Но здесь сыграло роль и другое обстоятельство. Попов подчинялся Военно-морскому ведомству, и ему было предписано не предавать широкой огласке свое изобретение, важность которого для военного флота не вызывала сомнений.

Однако полгода спустя итальянский инженер Маркони сделал патентную заявку на подобное изобретение, а в 1897 году опубликовал схему приемника, во всех отношениях аналогичного прибору Попова. Держать изобретение Попова более или менее в секрете уже не имело смысла, и по настоянию друзей Попов выступил в защиту своего приоритета. Между тем предприимчивые английские промышленники (в отличие и не к чести русских властей и промышленников), щедро субсидируя итальянского инженера, помогли ему развернуть опыты в самых широких масштабах. Более того, Маркони, несмотря на обстоятельные выступления Попова, объявил себя первым изобретателем радио. Однако в ученом мире, и не только в России, но и за границей, крупные физики — среди них Лодж, Бранли и др.— признали бесспорный приоритет А. С. Попова. В 1898 году о его изобретении было сделано сообщение в Парижской академии наук и во Французском физическом обществе, членом которого он состоял с 1894 года. Полное признание Попов получил в 1900 году на IV Международном электротехническом конгрессе в Париже, где он выступил с докладом о своем приборе. Попов сообщил конгрессу о своих совместно с П. Н. Рыбкиным последних достижениях — приеме электромагнитных сигналов на телефон, т. е. приеме разговорной речи, а не только сигналов азбуки Морзе.

После 1895 года А. С. Попов много энергии отдал внедрению беспроволочного телеграфа в русском морском флоте. Уже первое применение радиосвязи показало ее несомненные преимущества. В 1900 году во время спасательных работ на море переговоры с помощью приборов Попова велись на расстоянии до 50 *км*. Тогда же благодаря беспроволочному телеграфу была спасена группа финских рыбаков, которых уносило в море на льдине.

В 1901 году Попова пригласили на должность ординарного профессора физики в Электротехнический институт в Петербурге, хотя он и не имел необходимой для этого докторской степени. В 1905 году он стал первым выборным директором этого института. Ответственная административная работа подорвала и без того слабое здоровье Попова, и 13 января 1906 г. он скоропостижно скончался от кровоизлияния в мозг.

Выдающееся изобретение Попова не получило должного развития в дореволюционной России. Лишь прогрессивные люди, среди них прежде всего адмирал С. О. Макаров, прекрасно сознавали значение этого изобретения и деятельно требовали оказания ему всемерной поддержки. В то же время за границей уже шло промышленное освоение нового открытия, широко разрекламированные исследования связывались с именем Маркони. Все это привело, особенно после смерти Попова, к постепенному забвению его приоритета в изобретении радио. Лишь после Великой Октябрьской революции были восстановлены права и высоко оценены вы-

дающиеся заслуги А. С. Попова — замечательного ученого и изобретателя, творца радио — одного из самых великих изобретений XX века.

В настоящее время заслуги Попова признаны всемирно.

ТРУДЫ А. С. ПОПОВА

Протокол заседания Физического отделения Русского физико-химического общества о докладе А. С. Попова «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» 25 апреля 1895 г.— В кн.: Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. М.—Л., 1945, стр. 53—54.

То же под загл.: День рождения радио.— В кн.: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1945, стр. 56—57.

Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний.— В кн.: Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. М.—Л., 1945, стр. 55—64.

То же в кн.: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1945, стр. 57—68

О телеграфировании без проводов. (Сообщение 19 октября 1897 г. в Электротехническом институте).— В кн.: Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. М.—Л., 1945, стр. 83—93.

То же в кн.: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1956, стр. 78—91.

Описание телефонного приемника для депеш, посылаемых с помощью электромагнитных волн.— В кн.: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1945, стр. 123—130 с илл.

Описание, составленное к привилегии № 6066, выданной А. С. Попову 30 ноября 1901 года.

Патент на эту привилегию см. в кн.: Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. М.—Л., 1945, стр. 205—206.

То же в кн: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1946, стр. 133—134

Инструкция к употреблению приборов телеграфирования без проводов.— «Известия по минному делу», 1900, вып. 37, стр. 179—199.

То же: Отд. оттиск. Спб., 1900.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. С. ПОПОВА

Попов Александр Степанович (1859—1906).— БСЭ, 2-е изд., т. 34, 1955, стр. 157—160, портр.

Щеголев Е. Я. Александр Степанович Попов (1859—1906).— В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 193—201.

Аренберг А. Г. и **Шамшур В. И.** А. С. Попов — ученый, изобретатель и педагог.— «Физика в школе», 1954, № 3, стр. 3—13, портр.

Введенский Б. А. А. С. Попов — изобретатель радио. Лекция, прочитанная по циклу «Ломоносовские чтения» в декабре 1945 г. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948. 32 стр. с илл., портр. (Акад. наук СССР. Совет по науч.-техн. пропаганде).

Введенский Б. А. и **Фортушенко А. Д.** Изобретатель радио — А. С. Попов.— В кн.: 60 лет радио. Научно-технический сборник. М., Связьиздат, 1955, стр. 10—18.

Данилевский В. В. Великий новатор.— В кн.: А. С. Попов. Сборник документов. Л., 1945, стр. 7—38.

Капцов Н. А. А. С. Попов.— В кн.: Очерки по истории физики в России. М., Учпедгиз, 1949, стр. 163—170.

Берг А. И. А. С. Попов — изобретатель радио.— В кн.: Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. М.—Л., Акад. наук СССР, стр. 7—46.

Гогоберидзе Д. С. А. С. Попов, его жизнь и деятельность. (К 50-летию открытия физических основ радиолокации).— «Вестник Ленингр. ун-та», 1949, № 9, стр. 10—29, илл.

Сотин Б. С. Изобретатель радио А. С. Попов.— «Вопросы истории естествознания и техники», 1956, вып. 2, стр. 182—189, илл.

В статье приводятся важнейшие факты из биографии А. С. Попова и из истории изобретения им радио.

Шателен М. А. Александр Степанович Попов.—В кн.: Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. Изд. 2-е. М.—Л., 1955, стр. 318—350, портр.

Автор этого очерка — старейший русский электротехник, современник А. С. Попова. С большой полнотой раскрыто в очерке содержание печатных работ А. С. Попова, подробно описано знаменитое заседание Русского физико-химического бщества 24 марта 1896 года. Большого интереса полны страницы, на которых расоказывается история радиоустановки Котка—Гогланд, первой радиостанции, установленной А С. Поповым.

Головин Г. И. А. С. Попов — изобретатель радио. Жизнь и деятельность. К 50-летию изобретения радио. Под ред. и с предисл. И. Г. Кляцкина. М., Гос. изд. лит. по вопросам связи и радио, 1945. 240 стр. с илл. и портр.

В книге рассказывается об изобретении радио и первых днях его возникновения. Автором широко использованы не только свидетельства современников, но и богатый документальный материал наших архивов. Ценную помощь оказали автору сын А. С. Попова — А. А. Попов и ближайший помощник и друг А. С. Попова — П. Н. Рыбкин.

Берг А. И. и **Радовский М. И.** Изобретатель радио А. С. Попов. Изд. 3-е, испр. и доп. М.—Л., Госэнергоиздат, 1950. 188 стр. с илл. и портр.

Радовский М. И. Александр Степанович Попов. Биографический очерк. М.—Л., 1956. 207 стр.; 5 л. илл. и портр. (Акад. наук СССР. Науч.-попул. серия).

Переработанное издание предыдущей книги. Главы: Родные места А. С. Попова.— Молодые годы.— В Минном офицерском классе.— Изобретение радио.— Педагог и деятель высшей школы.

* *
*

Кудрявцев-Скайф С. Радио — детище русского флота. М., Воениздат, 1951. 96 стр., илл. и портр.

Первые опыты практического применения радио на судах военно-морского флота: работы станций беспроволочной телеграфии при спасении броненосца Балтийского флота, наскочившего на камни, и спасении рыбаков, унесенных в море на оторвавшейся льдине.

Базикайло В. А. А. С. Попов — основоположник современной радиометеорологии.— «Природа», 1951, № 11, стр. 70—72.

История опытов по выявлению грозовых разрядов и образованию облачности с помощью «грозоотметчика», проводившихся А. С. Поповым и метеорологом Г. А. Любославским в 1895—1897 гг.

ЮБИЛЕЙНЫЕ СБОРНИКИ

Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. Под ред. А. И. Берга. М.—Л., 1945. 309 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 2).

Содержание: А. И. Берг. А. С. Попов — изобретатель радио. — Документы и материалы (архивные документы о жизни и деятельности А. С. Попова, статьи, доклады и отчеты А. С. Попова, извлечения из книг и статей отечественных и зарубежных). — Воспоминания (см. ниже).

А. С. Попов. Сборник документов. К 50-летию изобретения радио. Сост. Г. И. Головин и Р. И. Карлина. Под ред. М. А. Шателена, И. Г. Кляцкина и В. В. Данилевского. Л., Лениздат, 1945. 255 стр., илл.; 1 л. портр.

В сборник включены отдельные труды А. С. Попова, его доклады, статьи и письма, а также архивные документы, относящиеся к истории изобретения радио, испытаниям первых приборов беспроволочного телеграфа, практическому введению нового средства связи на боевых кораблях.

ВОСПОМИНАНИЯ СОВРЕМЕННИКОВ А. С. ПОПОВА

Рыбкин П. Н. Десять лет с изобретателем радио. Страницы воспоминаний. Под ред. и с предисл. чл.-корр. Акад. наук СССР А. И. Берга. М., Связьиздат, 1945. 63 стр. с илл. и портр.

Автор этих воспоминаний — Петр Николаевич Рыбкин (1864—1948) — друг и соратник А. С. Попова, построивший вместе с ним первый в мире радиоприемник и организовавший практическое использование нового средства связи на кораблях русского флота.

Рыбкин П. Н. Как была изобретена первая в мире радиостанция. Из личных воспоминаний.— «Вестник связи. Электросвязь», 1945, № 5, стр. 6—7.

Миткевич В. Ф. Демонстрация первой радиотелеграфной установки. Воспоминания очевидца.— «Вестник связи. Электросвязь», 1945, № 5, стр. 8.

Изобретение радио А. С. Поповым. Сборник документов и материалов. Под ред. А. И. Берга. М.—Л., 1945. 309 стр., илл. (Акад. наук СССР. 50 лет радио. 1895—1945. Вып. 2).

В разделе «Воспоминания» напечатаны следующие материалы: Лифшиц С. Я. Моя работа с А. С. Поповым.— Реммерт А. А. Первая радиостанция, установленная А. С. Поповым в России. Воспоминания участника.— Угримов Б. На заре радио. Историческая справка.— Шателен М. А. О работах А. С. Попова на Парижском международном конгрессе по электричеству в 1900 году.— Шаховская Н. Из личных воспоминаний о А. С. Попове.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Лукомская А. М. Александр Степанович Попов. Библиографический указатель. Изд. 2-е, переработ. и доп. Под ред. К. И. Шафрановского. Вступит. статья чл.-корр. Акад. наук СССР М. А. Шателена. М.—Л., 1951. 297 стр. с илл. и портр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Б-ка. Комис. по истории физ.-матем. наук).

Самая полная библиография трудов А. С. Попова и литературы о нем, опубликованных в 1883—1950 гг. Основные разделы указателя: Работы А. С. Попова, опубликованные в печати. — Материалы о жизни и деятельности А. С. Попова.

Краткие библиографии в книгах:

Головин Г. И. А. С. Попов — изобретатель радио. М., Связьиздат, 1945, стр. 235—239 (труды А. С. Попова).

Берг А. И. и **Радовский М. И.** Изобретатель радио А. С. Попов. Изд. 3-е, испр. и доп. М.—Л., Госэнергоиздат, 1950, стр. 183—187.



ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ

(1866—1912)

«Какое призвание тебе кажется наилучшим? — Призвание исследователя и изобретателя».— Так писал в юношеском дневнике 16-летний П. Н. Лебедев, впоследствии знаменитый русский физик и непревзойденный мастер физического эксперимента.

П. Н. Лебедев родился 8 марта 1866 года в Москве в культурной семье торгового служащего. Первоначальное образование он получил в Петропавловской немецкой школе, чему был обязан прекрасным знанием немецкого языка, и в реальном училище. В 1884 году он поступил в Московское техническое училище (ныне МВТУ им. Н. Э. Баумана). Лебедев сильно увлекался различными, главным образом электротехническими изобретениями. Крупная неудача одного его изобретения впервые заставила его глубоко задуматься над физическими основами электротехники. Лебедев заинтересовался физикой и в 1887 году, не окончив курса учения, уехал в Германию, в Страсбургский университет. В Страсбурге (1887—1888), а затем в Берлине (1889—1890) он прошел блестящую школу экспериментальной физики у Августа Кундта (1839—1894) — «художника и поэта физики», как называл его Лебедев, крупного ученого и прекрасного педагога, из лаборатории которого вышли многие выдающиеся физики (Рентген, Фр. Пашен, О. Винер и др.). В Берлине Лебедев слушал также Гельмгольца, лекции которого немало способствовали расширению его физических взглядов и углублению математических познаний.

С самого начала научной деятельности в лаборатории Кундта Лебедев поражал своего учителя талантливостью, неисчерпаемым обилием и смелостью научных идей, неудержимым стремлением разрешать наиболее трудные вопросы. Основные интересы Лебедева концентрировались при этом на новой тогда электромагнитной теории света Максвелла и вытекавших из нее важных следствиях.

Замечательным экспериментальным доказательством правильности этой теории явились опыты Герца (1887—1888), в которых он впервые получил электромагнитные волны и исследовал их оптические свойства. В ходе этих опытов Герц открыл взаимодействие электромагнитной волны и электрического резонатора.

Лебедева, как и других физиков, чрезвычайно заинтересовало это явление, так как оно открывало новые возможности в изучении взаимодействий молекул как электрических резонаторов. В 1888 году П. Н. Лебедев одним из первых приступил к исследованиям в этой области.

Вторым вопросом, уже в эти годы живо его интересовавшим, был вопрос о давлении света. К выводу о существовании светового давления впервые теоретически пришел Максвелл (1873 г.), он же первый вывел формулу для вычисления величины давления света. К аналогичным выводам независимо от Максвелла пришел также итальянский физик Бартоли (1876 г.). Теоретическим обоснованием этого явления занимались в дальнейшем австрийский физик Больцман (1884 г.), немецкий астрофизик Целльнер (1884 г.), известный русский физик и сейсмолог Б. Б. Голицын (1892 г.) и др. Однако неоднократные попытки обнаружить и измерить световое давление опытным путем неизменно оказывались безрезультатными.

Исследование с точки зрения электромагнитной теории излучения природы молекулярных сил и опытное доказательство существования светового давления — эти две труднейшие проблемы стали основными пунктами научной программы Лебедева, составленной им в 1891 году.

Первой работой Лебедева в выполнении этой программы была его докторская диссертация на тему «Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссоти — Клаузиуса», которую он защитил в Страсбурге в 1891 году. В этой работе Лебедев впервые показал, что молекулы вещества в их взаимодействии с электромагнитными волнами действительно ведут себя, как электрические резонаторы. Во второй работе того же года — «Об отталкивающей силе лучеиспускающих тел» — Лебедев высказал глубокую идею, что механическое давление света с уменьшением размеров тел может значительно превосходить другие силы, действующие на тела, например силу ньютоновского тяготения. В этом Лебедев видел объяснение различных космических явлений — таких, как хвосты комет, зодиакальный свет и т. п. В этой же работе Лебедев указал, что взаимодействие электромагнитных волн с молекулами должно быть сложнее, так как последние не просто испытывают давление волны, но и как-то взаимодействуют с нею в качестве резонаторов.

В 1891 году Лебедев возвратился в Россию и по приглашению А. Г. Столетова начал работать в физической лаборатории Московского университета. Здесь он начинает ряд обширных исследований механического (пондеромоторного) воздействия волн самой различной природы на соответствующие резонаторы, чтобы таким путем выявить общие законы этого явления. Он проводит исследования с электромагнитными волнами Герца (1894 г.), с гидродинамическими (1896 г.) и акустическими волнами (1897 г.) и приходит в результате к фундаментальному выводу, что



Петр Николаевич Лебедев

различные по своей физической природе волны тождественно действуют на соответствующие резонаторы.

За работы 1891—1897 гг., опубликованные в трех статьях (Лейпциг, 1894, 1896, 1897 гг.) и представленные в 1899 году в качестве магистерской диссертации («Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы»), Лебедеву была присуждена Московским университетом степень доктора. В 1900 году он был избран профессором Московского университета.

Во время опытов с электромагнитными волнами Лебедев впервые получил волны длиною в 3 *мм*, а для волн в 6 *мм* исследовал их оптические свойства. До этого в качестве наиболее коротких волн, получаемых с помощью электрического вибратора Герца, были известны волны в 60 *см* длиною, полученные самим Герцем. Результаты Лебедева почти 30 лет оставались непревзойденными.

После 1897 года Лебедев приступил к непосредственному опытному доказательству и измерению давления света на твердые тела.

Огромная трудность в измерении светового давления заключалась в наличии мешающих побочных эффектов, главным образом так называемого радиометрического эффекта, который всегда действует в том же направлении, что и световое давление. Достаточно сказать, что в опытах предшественников Лебедева (В. Крукс, Бартоли) этот эффект превышал ожидаемую величину светового давления в тысячи раз.

Гениальность Лебедева как экспериментатора и заключается прежде всего в том, что остроумными методами он впервые сумел предельно уменьшить действие этих мешающих эффектов.

В частности, для уменьшения радиометрического эффекта Лебедев добился получения чрезвычайно высокого по тем временам вакуума, впервые применив новый метод откачки насосов. Идея этого метода лежит в основе действия наиболее совершенных в настоящее время диффузионных насосов. В 1899 году в результате трехлетней напряженной работы Лебедев впервые в истории науки экспериментально обнаружил и измерил давление света на твердые тела. Основной частью прибора были тончайшие металлические и слюдяные крылышки диаметром 5 *мм*, которые под действием давления луча света поворачивались и закручивали нить крутильных весов. Результат, полученный им, совпадал с предсказаниями Максвелла и с выводами Бартоли.

О положительном результате своих опытов Лебедев сообщил впервые в мае 1899 года на заседании ученого общества в Лозанне. Более полное сообщение он сделал в августе 1900 года на Международном конгрессе физиков в Париже. В 1901 году в Лейпциге в ведущем немецком научном журнале «Annalen der Physik» была опубликована работа Лебедева «Опытное исследование светового давления».

Сообщение Лебедева произвело огромное впечатление. Один из крупнейших физиков того времени Уильям Томсон (Кельвин) в беседе с К. А. Тимирязевым сказал: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь вое-

вал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами» [1].

После 1900 года известность Лебедева становится всемирной, статьи его переводятся на различные языки. За работы о световом давлении на твердые тела Лебедеву присуждается премия Петербургской академией наук.

Едва закончив исследования о давлении света на твердые тела, П. Н. Лебедев, несмотря на резко обострившуюся тяжелую болезнь сердца, уже в 1902 году приступает к экспериментальному доказательству существования светового давления на газы.

Эта задача была несравненно более сложной. Давление света на газы по расчетам в сотни раз меньше, чем на твердые тела. Принципиально измерить его можно было бы по движению (под давлением луча света) газа, толкающего при этом очень легкий поршенек, прикрепленный к коромыслу крутильных весов. По самой сути дела в этом опыте исключался высокий вакуум, что резко увеличивало всевозможные мешающие эффекты. По расчетам немецкого физика и астронома Шварцшильда они должны были настолько перекрывать эффект светового давления на молекулы газа, что измерение последнего не представлялось возможным. Некоторые ученые (Аррениус, Зоммерфельд и др.) вовсе отрицали существование давления света на газы. Но вместе с тем многие физики и астрономы ждали продолжения работ по доказательству светового давления и ждали их от Лебедева.

Работа оказалась действительно необычайно трудной. Пять лет продолжались тончайшие опыты. Только в 1907 году на I Менделеевском съезде П. Н. Лебедев мог сообщить о своем открытии светового давления на газы. В 1910 году исследования были завершены и результаты их опубликованы в «Annalen der Physik». Итоги пяти лет [2] огромных усилий, колоссального напряжения ума и технической изобретательности были подведены на 26 страничках статьи «Давление света на газ». Эта статья потрясла весь ученый мир. Шварцшильд прислал Лебедеву письмо, полное удивления и восхищения. В 1911 году Королевский институт Великобритании избрал Лебедева своим почетным членом.

Научная программа Лебедева была выполнена, однако все новые и новые проблемы захватывали ученого. Во время исследования светового давления на газы Лебедев заинтересовался астрофизикой. Он принимал участие в работе Международной комиссии по исследованию Солнца, деятельно участвовал в дискуссии о существовании дисперсии света в межзвездном пространстве (изменения скорости света в зависимости от длины волны) и впервые правильно указал, что причиной явления не может быть межзвездная среда. Но наиболее крупными исследованиями последних лет жизни Лебедева были его экспериментальные исследования магнетизма вращения. Поводом к ним явилось открытие магнитных полей в солнечных пятнах, т. е. в областях, где наблюдаются вихревые дви-

---

[1] Лебедев П. Н. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1949, стр. 24.

[2] Разрешению этой проблемы Лебедев отдал 10 лет жизни.

жения материи в атмосфере Солнца. Лебедев пытался проверить существовавшую в то время гипотезу, что уже само вращение тела вызывает появление вокруг него магнитного поля. Этим он стремился объяснить причину земного магнетизма. Однако результаты опытов оказались отрицательными. Вопрос о происхождении геомагнетизма продолжает оставаться открытым еще и в настоящее время.

Научная деятельность Лебедева была теснейшим образом связана с его педагогической работой. С самого начала работы в Московском университете вокруг Лебедева стали группироваться талантливые начинающие физики — его ученики. После создания в 1904 году Физического института при Московском университете работы Лебедева и его учеников были перенесены в лабораторию этого института. Здесь оформилась знаменитая лебедевская школа в русской физике, из которой вышли многие видные советские физики.

В 1911 году и без того подорванному напряженным трудом и тяжелой болезнью здоровью Лебедева был нанесен новый удар. В знак протеста против реакционной политики тогдашнего министра просвещения Кассо Лебедев в числе многих других передовых ученых вынужден был покинуть Московский университет, с работой в котором была неразрывно связана вся его жизнь. Большинство учеников Лебедева ушло из университета вместе со своим учителем. Уход из университета опрокидывал все научные планы Лебедева, не говоря уже о том, что это тяжело отразилось и на его материальном положении.

Лебедева приглашали работать в Нобелевский институт в Стокгольме, в Петербург — в Палату мер и весов, но он отказался от всех этих предложений, не желая оставлять своих учеников.

По инициативе учеников на частные средства в Москве весной 1911 гг. была создана специально для Лебедева физическая лаборатория, где он — уже смертельно больной — еще работал некоторое время. В том же году, также на частные средства, начал строиться Физический институт (ныне Физический институт Академии наук СССР имени П. Н. Лебедева). Но было уже поздно. 14 марта 1912 года Петр Николаевич Лебедев скончался от сердечного припадка.

ТРУДЫ П. Н. ЛЕБЕДЕВА

Лебедев П. Н. Собрание сочинений. 1. Научные работы. 2. Популярные статьи и речи. М., Моск. физ. о-во им. П. Н. Лебедева, 1913. XXIV, 415 стр.; илл.; 12 л. илл и портр.

Кроме работ, перечисленных в описанной ниже книге, в этот том включен ряд других работ: «О кажущейся дисперсии света в пространстве», «Прибор для проложения звуковых колебаний», «Август Кундт», «Экспериментальные работы А. Г. Столетова», «Способы получения высоких температур» и др.

Лебедев П. Н. Избранные сочинения. Под ред. и с предисл. проф. А. К. Тимирязева. М.—Л., Гостехиздат, 1949. 243 стр.; 4 л. илл. и портр. (Классики естествознания. Математика. Механика. Физика. Астрономия).

Содержание: Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти—Клаузиуса. Диссертация на степень доктора, представленная

физико-математическому факультету Страсбургского университета.— Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел. — О двойном преломлении лучей электрической силы.— Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы.— Опытное исследование светового давления. — Физические причины, обусловливающие отступления от гравитационного закона Ньютона. — Термоэлементы в пустоте, как прибор для измерения лучистой энергии.— Опытное исследование давления света на газы. — Предельная величина коротких акустических волн. Магнитометрическое исследование вращающихся тел. Первое сообщение.

Лебедев П. Н. Давление света. Под ред. акад. П. П. Лазарева и проф. Т. П. Кравца. М., Гос. изд., 1922. 94 стр.; 1 л. портр. (Классики естествознания).

Лебедев П. Н. Из переписки.— В кн.: Научное наследство. Т. 1. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948, стр. 549—619.

В книге опубликовано 28 писем П. Н. Лебедева, представляющих собой часть его собрания документов и писем, хранящегося в Архиве Академии наук СССР. Среди адресатов Лебедева — его мать А. П. Лебедева, Н. А. Умов, Н. П. Кастерин, К. А. Тимирязев, Б. Б. Голицын, ряд иностранных ученых: Крукс, Сванте Аррениус, Лоренц и др. В переписке отражены многие стороны научно-исследовательской и организаторской деятельности П. Н. Лебедева.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ П. Н. ЛЕБЕДЕВА

Биографические очерки

Лебедев Петр Николаевич (1866—1912).— БСЭ, 2-е изд., т. 24, 1953, стр. 380—381, портр.

Зернов В. Д. Петр Николаевич Лебедев. (1866—1912 гг.). К 80-летию со дня рождения.— «Физика в школе», 1946, № 3, стлб. 19—32.

Вавилов С. И. Петр Николаевич Лебедев. (1866—1912).— В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 241—249, портр.

Аркадьев В. К. Выдающийся русский физик. (К 40-летию со дня смерти П. Н. Лебедева).—«Природа», 1952, № 4, стр. 93—96, портр.

Лазарев П. П. Петр Николаевич Лебедев. (Биографический очерк).— В кн.: Лебедев П. Н. Избранные сочинения. М.—Л., Гостехиздат, 1949, стр. 9—32.

То же в кн.: А. Г. Столетов. Н. А. Умов. П. Н. Лебедев. Б. Б. Голицын. Л., Науч. хим.-техн. изд. НТУ ВСНХ, 1927, стр. 37—70.

Зернов В. Д. Петр Николаевич Лебедев. Очерк жизни и деятельности).— «Ученые записки Моск. гос. ун-та». Юбилейная серия, 1940. Вып. 52. Физика, стр. 125—150.

Тимирязев А. К. П. Н. Лебедев.— В кн.: Очерки по истории физики в России. Пособие для студентов и учителей. Под ред. проф. А. К. Тимирязева. М., Учпедгиз, 1949, стр. 145—163.

Капцов Н. А. Петр Николаевич Лебедев. 1866—1912. Биографический очерк. М., 1950. 26 стр. (Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч. б-ка им. А. М. Горького. Замечат. ученые Моск. ун-та).

Кравец Т. П. Петр Николаевич Лебедев и его творчество.— В кн.: Петр Николаевич Лебедев. Библиографический указатель. Сост. А. М. Лукомская. М.—Л., Акад. наук СССР, 1950, стр. 11—32.

Соминский М. С. П. Н. Лебедев и прогресс физики. (К 40-летию со дня смерти).—«Журн. техн. физики», 1952, т. 22, вып. 7, стр. 1221—1248.

Дуков В. М. П. Н. Лебедев. Изд. 2-е. М., Учпедгиз, 1956. 120 стр.; илл. и портр.; 1 л. портр. (Классики физики).

Популярный очерк жизни и научно-педагогической деятельности. Использованы труды П. Н. Лебедева, его переписка, воспоминания о нем его учеников — видных советских физиков. В ряде живо написанных глав рассказано о годах учения П. Н. Лебедева, выборе пути в науке, докторской диссертации, о всемирно известных работах, доказавших давление света, о работах по магнитометрическому исследованию вращающихся тел, о Лебедеве — организаторе школы физиков и превосходном педагоге.

Шугайлин А. В. Выдающийся физик-материалист П. Н. Лебедев. Киев, Акад. наук УССР, 1957. 176 стр. с илл.; 1 л. портр. (Акад. наук УССР. Ин-т философии).

Наиболее крупная биография П. Н. Лебедева, написанная на основе печатных и архивных материалов.

Главы книги: 1. П. Н. Лебедев — ученый-патриот. 2. Философские взгляды П. Н. Лебедева. 3. Открытие П. Н. Лебедевым светового давления. 4. Значение открытия светового давления для современной науки.

Воспоминания современников и учеников

Тимирязев К. А. Смерть Лебедева.— Петр Николаевич Лебедев. (Некролог).— Лебедев-классик.— В кн.: Тимирязев К. А. Сочинения. Т. 8. М., Сельхозгиз, 1939, стр. 308—312, 313—319, 320—322.

Лазарев П. П. Очерки истории русской науки. Под ред. акад. С. И. Вавилова и проф. М. П. Воларовича. М.—Л., 1950. 248 стр. (Акад. наук СССР. Серия «Итоги и проблемы современной науки»).

П. Н. Лебедеву посвящены в этом сборнике следующие материалы: Лебедевская лаборатория при Городском университете имени А. Л. Шанявского в Москве (стр. 66—71). — Памяти великого русского физика П. Н. Лебедева. (Некролог) (стр. 113—117).— П. Н. Лебедев и русская физика (стр. 118—129). — Взгляды П. Н. Лебедева на организацию научных исследований (стр. 130—135). — П. Н. Лебедев. Биография (стр. 136—148).—Воспоминания о П. Н. Лебедеве. Биография (стр. 149—166).

Капцов Н. А. Воспоминания о Петре Николаевиче Лебедеве.—«Успехи физ. наук», 1952, вып. 3, стр. 325—328.

Воспоминания относятся к 1902—1904 гг.

Тимирязев А. К. Из воспоминаний о Петре Николаевиче Лебедеве.— «Успехи физ. наук», 1952, вып. 3, стр. 321—324.

Аркадьев В. К. Из воспоминаний о Петре Николаевиче Лебедеве.— «Электричество», 1946, № 9, стр. 69—70.

Открытие П. Н. Лебедевым светового давления

История открытия светового давления занимает центральное место во всех перечисленных выше биографиях П. Н. Лебедева.

Популярно о сущности и значении этого открытия рассказано в статье:

Кравец Т. П. К пятидесятилетию открытия светового давления.— «Наука и жизнь», 1950, № 8, стр. 35—37, портр.

Более полно это раскрыто в статьях:

Кравец Т. П. П. Н. Лебедев и световое давление.— «Успехи физ. наук», 1952, вып. 3, стр. 306—320.

Работы П. Н. Лебедева в области светового давления и их значение для развития термодинамики, квантовой теории, теории относительности. Исследования учеников П. Н. Лебедева по световому давлению.

Фабрикант В. Работы П. Н. Лебедева по световому давлению.— «Успехи физ. наук», 1950, Т. 42, вып. 2, стр. 282—310, портр.

Анализируя опыты П. Н. Лебедева по измерению давления света, автор приходит к выводу, что каковы бы ни были новые успехи в области техники физического эксперимента, опыты Лебедева всегда будут образцом экспериментального искусства. В статье приводятся также взгляды Лебедева на роль светового давления в космических явлениях.

Шугайлин А. В. Об открытии светового давления П. Н. Лебедевым.— «Вопросы философии», 1950, № 3, стр. 192—210.

Основной вывод статьи: открытие Лебедева является ярким подтверждением положения диалектического материализма о неразрывности материи и движения.

Литература, посвященная другим исследованиям П. Н. Лебедева

Ильин В. В. Проблема молекулярных сил в работах П. Н. Лебедева и Б. Б. Голицына.— «Ученые записки Моск. гос. ун-та», 1946, вып. 92, т. 1, кн. 2, стр. 63—68.

Киселев Б. А. Работы П. Н. Лебедева по инфракрасной спектроскопии.— «Успехи физ. наук», 1950, т. 40, вып. 2, стр. 313—317.

Мороз Л. И. Работы проф. П. Н. Лебедева и его школы в области акустики.— «Сборник трудов» (Ленингр. отд. Всесоюз. науч. инж.-техн. о-во водного транспорта), Вып. 1. Л.—М., 1954, стр. 105—121.

Роль П. Н. Лебедева и его учеников в разработке теории звукового давления, определении абсолютной силы звука, открытии ультракоротких звуковых волн.

Сердюков А. Р. К истории отечественной реактивной техники. (Проекты двигателей для воздухоплавания П. Н. Лебедева).— «Успехи физ. наук», 1953, т. 50, вып. 2, стр. 309—313.

В статье приводятся извлеченные из Архива Академии наук СССР наброски проектов реактивных двигателей, сделанные Лебедевым в 1892 году. Один из них содержит элементы так называемого пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. Подчеркивается связь научных интересов Лебедева с техникой, смелость его идей.

Школа П. Н. Лебедева и ее значение в развитии русской физики

Капцов Н. А. Школа Петра Николаевича Лебедева.— «Ученые записки Моск. гос. ун-та». Юбилейная серия, 1940. Вып. 52. Физика. стр. 151—165.

Научная, практическая и педагогическая деятельность физиков, вышедших из школы П. Н. Лебедева.

Сердюков А. Р. Первая большая школа физиков в России.— «Природа», 1952, № 4, стр. 97—103.

Школа П. Н. Лебедева как крупный центр коллективных научных исследований, влияние этой школы на организацию новых очагов физической науки в России.

Сердюков А. Р. Петр Николаевич Лебедев.— «Вестник высшей школы», 1957, № 2, стр. 78—83.

П. Н. Лебедев — педагог и основатель школы русских физиков.

Из серии статей «Выдающиеся педагоги отечественной высшей школы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Петр Николаевич Лебедев. Библиографический указатель. Сост. А. М. Лукомская. Под ред. К. И. Шафрановского. М.—Л., 1950. 185 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Б-ка. Комис. по истории физ.-матем. наук).

Указатель состоит из следующих разделов: Работы П. Н. Лебедева, опубликованные в печати (стр. 36—60). — Материалы о жизни и деятельности П. Н. Лебедева (стр. 61—120). — Основная литература по вопросам светового давления (стр. 121—164).

Гаухман Р. П. Библиография печатных трудов П. Н. Лебедева. Критико-биографическая литература о П. Н. Лебедеве.— В кн.: Петр Николаевич Лебедев. 1866—1912. М., Моск. гос. ун-т, 1950, стр. 27—38.

ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

(1871—1937)

Эрнест Резерфорд — один из величайших физиков мира — родился 30 августа 1871 года в маленькой новозеландской деревне Брайтоутер, близ г. Нельсона в семье мелкого фермера. Блестящие и разнообразные способности Резерфорда, благодаря которым он уже в начальной школе неизменно получал награды в виде стипендий, позволили ему закончить на эти средства среднюю, а затем и высшую школу. Вскоре после окончания Кентербери-колледжа при Новозеландском университете в г. Крайсчерче Резерфорд уехал в Англию, в Кембридж, где в течение трех лет (1895—1897 гг.) работал в знаменитой Кевендишской лаборатории, директором которой был в то время крупнейший английский физик Дж. Дж. Томсон. Затем Резерфорд был приглашен в университет в г. Монреале (Канада), где в течение 10 лет руководил кафедрой физики. После возвращения в 1907 году в Англию он занимал должность профессора Манчестерского, а затем Кембриджского университетов, был директором Кевендишской лаборатории и, наконец (с 1927 г.), профессором «натуральной философии» (физики) Королевского института в Лондоне. С 1903 года Резерфорд — член, а с 1925 по 1930 гг.— президент Лондонского королевского общества. Кроме того, он был почетным членом многих иностранных академий наук, в том числе Академии наук СССР (с 1922 г.). За свои открытия Резерфорд неоднократно получал награды— медали Румфорда (1905 г.), Коплея (1922 г.), Франклина (1924 г.) и др. В 1908 году он был удостоен высшей международной награды — Нобелевской премии по химии.

Великий ученый создал самую крупную в мире школу физиков, продолживших его исследования. Учениками Резерфорда были знаменитые физики Нильс Бор, Чедвик, открывший нейтрон, Вильсон, Кокрофт, Уолтон, Астон, Милликэн, Эддингтон, советский ученый П. Л. Капица и др.

Научными исследованиями Резерфорд начал заниматься еще в студенческие годы. Уже первая работа, в которой он сообщил о своем откры-

тии явления размагничивания железа под действием электромагнитных волн Герца (радиоволн), произвела большое впечатление в университетских кругах.

В Кевендишской лаборатории под руководством Д. Д. Томсона Резерфорд изучал прохождение электричества через газы, результатом чего было открытие им тока насыщения в газах (максимальная величина тока в газе, соответствующая ионизации всех или почти всех молекул и атомов данного объема газа, вследствие чего дальнейшее увеличение напряжения на электродах газоразрядной трубки уже не вызывает заметного увеличения силы тока).

Совместно с Д. Д. Томсоном Резерфорд исследовал ионизацию газов, в частности, методы ионизации воздуха при помощи рентгеновских лучей, открытых незадолго до этого (1895 г.). Эти исследования не только принесли молодому физику известность в ученом мире, но и определили направление всей его дальнейшей научной деятельности. Томсон в изучении ионизации газов пытался найти ключ к решению сложнейшей задачи — строения электричества и вещества. Это же стало основной целью научных исследований Резерфорда, который еще в 1891 году в научном студенческом обществе высказал мысль о сложной структуре атома. Работа с Д. Д. Томсоном привела Резерфорда к исследованию только что открытого Беккерелем (1896 г.) явления радиоактивности и в дальнейшем — к величайшим открытиям в области атомной физики, созданию ядерной физики и искусственному превращению элементов. Этими исследованиями Резерфорд занимался, начиная с 1897 года, во время своего пребывания в Монреале и Манчестере.

В 1899 году Резерфорд, сравнивая рентгеновские лучи с урановыми (или беккерелевыми, как их тогда называли), обнаружил, что уран испускает два вида лучей. Те из них, которые обладают большей энергией и большой ионизирующей способностью, Резерфорд назвал альфа-, другие — бета-лучами (третья составная часть излучения радиоактивных веществ — гамма-лучи — была вскоре открыта Виллардом).

В дальнейшем, в опытах над излучением радия — наиболее радиоактивного элемента на Земле — Резерфорд обнаружил отклонение альфа- и бета-лучей в электрическом и магнитном полях и сделал (1902 г.) вывод о корпускулярной природе этих лучей. Он показал, что бета-лучи являются потоком быстрых электронов, и высказал правильную мысль о том, что альфа-лучи представляют собою ядра гелия. Окончательно природу альфа-лучей Резерфорд установил в 1909 году с помощью остроумного, наглядного и в то же время простого по идее опыта. Еще ранее, в 1900 году он открыл, что наиболее радиоактивным элементом является не сам радий, а испускаемый им в результате распада радиоактивный газ, который Резерфорд назвал эманацией (истечением) радия [1]. Этим элементом Резерфорд и воспользовался как источником альфа-лучей в своем опыте. Идея его сводилась к следующему: образующиеся при радиораспаде бы-

---

[1] В том же 1900 г. мысль о существовании эманации радия и ее исключительно большой радиоактивности высказала, независимо от Резерфорда, Мария Кюри.



Эрнест Резерфорд

стро летящие альфа-частицы (ядра гелия) должны «пробивать» тонкие (до 0, 01 *мм*) стенки стеклянного запаянного сосуда, содержащего эманацию радия, тогда как атомы самой эманации — менее энергичные — не могут диффундировать сквозь стенки. Проникнув сквозь стенки сосуда, альфа-частицы попадают в вакуумное пространство и, неизбежно встречаясь там с электронами, рекомбинируют в атомы гелия. Присутствие гелия действительно было обнаружено путем спектрального анализа образовавшегося газа.

Чрезвычайно важным было открытие Резерфордом самой эманации радия (а также вскоре и эманации тория).

Химические свойства этого газа, изученные Резерфордом совместно со своим ближайшим сотрудником, впоследствии выдающимся физиком Фредериком Содди, оказались близкими к свойствам инертных газов. Так впервые было открыто самопроизвольное превращение одного химического элемента в другой, правда, неустойчивый, временно существующий элемент.

Вскоре после этого, в 1903 году, Пьер Кюри обнаружил самопроизвольное и непрерывное выделение радием тепла, и Резерфорд (как одновременно и независимо от него М. и П. Кюри) с уверенностью высказал мысль, что это явление — результат атомных превращений. На основании этих открытий Резерфорд и Содди в том же году предложили теорию механизма радиоактивного распада: атомы радиоактивных элементов непрерывно и самопроизвольно распадаются, превращаясь в атомы других химических элементов, а «неиспользованные осколки» прежних атомов за счет внутриатомной энергии выбрасываются в виде альфа- и бета-частиц, что сопровождается также излучением гамма-лучей.

Появление теории Резерфорда и Содди положило начало новой важнейшей области современной физики — ядерной физике и учению об атомной энергии.

При дальнейшем изучении различных вновь и вновь открываемых радиоактивных элементов обнаружилось, что среди них имеются элементы химически идентичные, т. е. обладающие одинаковым зарядом ядра, но с несколько различными атомными весами (массами ядер) и радиоактивными свойствами. Попытки распределить такие элементы в периодической системе Менделеева привели Содди к введению понятия изотопов — элементов, занимающих в периодической таблице одну и ту же клеточку (по величине заряда).

В Манчестере (с 1907 г.) Резерфорд сосредоточил свое внимание исключительно на исследовании внутреннего строения атома при помощи альфа-частиц. Вместе с немецким физиком Г. Гейгером им был разработан для этой цели особый метод сцинтилляций, позволяющий определять число альфа-частиц по вспышкам (сцинтилляциям), возникающим при ударении альфа-частиц об экран, покрытый люминесцирующим веществом (например сернистым цинком). Кроме того, Резерфорд и Гейгер изобре-

ли (1908 г.) особый счетчик альфа-частиц по разряду в газе, происходящему при попадании в газ каждой альфа-частицы [1].

Спустя два года изучение свойств отдельных альфа-частиц привело Резерфорда к величайшему открытию — установлению структуры атома. В 1910 году по поручению Резерфорда молодой ученый Марсден исследовал рассеяние альфа-частиц при прохождении их сквозь тонкие металлические пленки. Вопреки ожиданиям, многие альфа-частицы резко изменяли свой путь внутри вещества и даже отскакивали назад. Этого не должно было случиться, если бы атомы вещества представляли собою, согласно модели Д. Д. Томсона, сферы с распределенным по всему объему положительным зарядом и вкрапленными в это заряженное облачко материи электронами: алфа-частицы пробивали бы их, по выражению Резерфорда, как пуля бумагу.

Пытаясь объяснить обнаруженный им закон рассеяния альфа-частиц в веществе, Резерфорд сделал фундаментальный вывод: весь положительный заряд атома должен быть сосредоточен в его центре: только в этом случае атом может быть серьезным препятствием на пути альфа-частицы.

Продолжив эти исследования, Резерфорд к 1911 году завершил создание своей знаменитой планетарной модели атома.

Согласно Резерфорду, атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра, размер которого (10^{-12}—10^{-13} в диаметре) в 100 000 раз меньше размеров всего атома, и легких отрицательных частиц — электронов, обращающихся вокруг ядра, подобно планетам вокруг Солнца. Вместо ньютоновских сил тяготения здесь действуют кулоновские силы притяжения, уравновешиваемые центробежными силами, возникающими при движении электронов вокруг ядра. Заряд ядра равен сумме зарядов электронов, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Однако далеко не сразу физики отказались от модели атома Д. Д. Томсона и признали модель Резерфорда. Дело в том, что согласно классической и общепризнанной тогда электродинамике Максвелла—Лоренца электроны в планетарной модели атома, двигаясь с ускорением по своим орбитам, должны непрерывно излучать энергию и затем, израсходовав ее в миллионные доли секунды, упасть на ядро, что противоречило наблюдаемой устойчивости атомов обычных химических элементов.

В 1913 году модель атома Резерфорда была усовершенствована его учеником — одним из крупнейших физиков современности — датским ученым Нильсом Бором (род. в 1885 г.), который устранил в модели Резерфорда противоречие между действительной устойчивостью атомов обычных химических элементов и вытекающей из классической электродинамики неизбежностью разрушения их как планетарных систем. Бор использовал введенные Планком (1900 г.) представления о дискретности (прерывности) энергии. В основу своей теории Бор положил три смелых утверждения — *постулата*, не согласовавшихся с классической электроди-

---

[1] В настоящее время усовершенствованная конструкция этого счетчика—так называемый счетчик Гейгера—Мюллера — играет первостепенную роль в изучении различных заряженных частиц, образующихся при ядерных реакциях или приходящих к нам из глубин Вселенной в виде космических лучей.

намикой. Первый из них гласит: электрон в атоме (рассматривался атом водорода) может устойчиво двигаться лишь по некоторым определенным орбитам. Радиусы этих орбит составляют прерывный ряд, соответствующий прерывному ряду возможных значений энергии атома. Согласно второму постулату при движении по дозволенным орбитам электрон вопреки классической электродинамике не испускает никакого электромагнитного излучения. Излучение энергии происходит лишь при скачкообразном переходе электрона с одной орбиты на другую. Наконец, в третьем постулате утверждалось, что энергия, испускаемая при таком переходе, равна разности энергий электрона на начальной и конечной орбитах.

При помощи модели Резерфорда, дополненной постулатами Бора, впервые оказалось возможным теоретически рассчитать спектр атома водорода, ионизованного гелия и некоторых других ионизованных атомов. Дальнейшее, более детальное исследование внутренней структуры и свойств атома стало возможным лишь с созданием квантовой механики.

Исследования в области радиоактивности и внутреннего строения атома привели Резерфорда в 1919 году к триумфу его научной деятельности — к открытию великому и удивительному, к осуществлению, казалось бы, фантастической мечты средневековых алхимиков — искусственному превращению химических элементов. В 1919 году в Кевендишской лаборатории Резерфорд облучил потоком быстро движущихся альфа-частиц атомы нерадиоактивного, устойчивого изотопа азота и в результате получил нерадиоактивный, устойчивый изотоп кислорода. В течение нескольких последующих лет, работая уже с мощными ускорителями альфа-частиц, Резерфорд осуществил превращение 17 легких элементов — бора, фтора, натрия, алюминия, лития, фосфора и др.

Одну из своих лекций, прочитанную в 1936 году в Ньюнхемском колледже (Кембридж) и посвященную искусственному превращению элементов, Резерфорд так и назвал «Современная алхимия» [1].

Продолжая свои исследования атомного ядра, Резерфорд в 1920 году на одном из заседаний Королевского общества предсказал существование в ядре атома нейтральной частицы, по массе равной протону (ядру водорода). Через 12 лет эта частица была действительно обнаружена в опытах Ирэн и Фредерика Жолио-Кюри, а природа ее определена учеником Резерфорда английским физиком Чедвиком.

Резерфорд обладал могучим здоровьем, и смерть его 19 октября 1937 года в результате неудачной хирургической операции явилась полной неожиданностью и большим ударом для всего ученого мира. Могила Резерфорда находится в Вестминстерском аббатстве, рядом с могилой Ньютона.

ТРУДЫ Э. РЕЗЕРФОРДА

Резерфорд Э. Современное положение атомной теории.— В кн.: Философия науки. Естественнонаучные основы материализма. Ч. 1. Физи-

[1] «Успехи физ. наук», 1938, т. 19, вып. 1, стр. 18—48.

ка. Под ред. проф. А. К. Тимирязева. Вып. 2. М.—Л., Гос. изд., 1924, стр. 204—222.

Речь на годичном съезде Британской ассоциации для развития наук в Виннипеге (Канада) в 1909 году.

Резерфорд Э. Строение атома и искусственное разложение элементов. Работы 1919—1922 гг. Подгот. к печати Э. В. Шпольский. М.—Пг., Гос. изд., 1923. 177 стр. с илл. (Современ. проблемы естествознания).

В сборник вошли следующие работы Э. Резерфорда: Рассеяние альфа-частиц. — Строение атома. — Столкновение альфа-частиц с легкими атомами. — Нуклеарное строение атома. — Искусственное расщепление легких элементов (написано совместно с Дж. Чедвиком). — Расщепление элементов альфа-частицами (также совместно с Дж. Чедвиком).

Резерфорд. Лодж. Эддингтон. Атомы, электроны, эфир. Пер. В. З. Курбатовой и А. И. Михалевича. Под ред. В. Я. Курбатова. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1924. 98 стр. (Успехи науки и техники)

Работы Э. Резерфорда, включенные в сборник: История жизни альфа-частицы (стр. 7—26). Доклад, прочитанный в Лондоне 15 июня 1923 г. — Строение вещества из электричества (стр. 27—53). Речь на открытии Британской ассоциации в Ливерпуле 12 сентября 1923 г.

Резерфорд Э. Электрическая природа материи. — В кн.: Сведберг Т. Материя, ее исследование в прошлом и настоящем. М., Гос. изд., 1924, стр. 129—164.

Президентская речь на съезде Британской ассоциации для развития наук в Ливерпуле в 1923 году.

Резерфорд Э. В погоне за атомом. Электрическое строение вещества. Биография альфа-частицы. Искусственное разложение элементов. Электричество и материя. С прил. краткой биографии автора. Пер. проф. В. П. Федорова. М.—Л., Л. Д. Френкель, 1924. 120 стр.

Резерфорд Э. Атомные снаряды и их свойства. Пер. с англ. И. Э. Любарского. Пг., Сев.-зап. промбюро ВСНХ, 1923. 60 стр. с илл.

Шесть лекций, прочитанных Резерфордом в 1923 году в Лондонском королевском институте.

Резерфорд Э. Естественное и искусственное разложение элементов. — «Успехи физ. наук», 1925, т. 5, вып. 1—2, стр. 28—44.

Речь на торжественном чествовании столетия Франклиновского института в Филадельфии.

Резерфорд Э. Современная алхимия. Пер. с англ. — «Успехи физ. наук», 1938, т. 19, вып. 1, стр. 18—48.

Лекция, прочитанная в 1936 году в Кембридже на тему об открытиях в области превращения элементов.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Э. РЕЗЕРФОРДА

Резерфорд Эрнест (1871—1937). — БСЭ, 2-е изд., т. 36, 1955, стр. 266—267, портр.

Файнбойм И. Б. Эрнест Резерфорд. — «Физика в школе», 1938, № 2 стр. 13—26.

Файнбойм И. Б. Эрнест Резерфорд. (К 85-летию со дня рождения). — «Физика в школе», 1956, № 5, стр. 92—95, портр.

Краткие биографические сведения. Резерфорд — руководитель Кевендишской лаборатории. Творческий облик Резерфорда по воспоминаниям советских и зарубежных уче-

ных: Н. А. Шилова, П. Л. Капицы, Ганса Гейгера и др. Отмечается, в частности, что Резерфорд всегда подчеркивал интернациональный характер науки и говорил, что для ее прогресса «существенна совместная работа народов, как и отдельных ученых».

Померанчук И. Я. Эрнест Резерфорд. 1871—1937.— «Химия в школе», 1938, № 1, стр. 91—95.

Лазарев П. П. Эрнест Резерфорд. Некролог.— «Электросвязь», 1938, № 1, стр. 157—159.

Харитон Ю. Б. Эрнест Резерфорд. (1871—1937).— «Природа», 1938, № 3, стр. 148—154.

Одна из наиболее значительных статей о Резерфорде на русском языке. Автор говорит о главных работах Резерфорда; об оживленных дискуссиях (с Беккерелем, Марией Кюри и др.) по поводу смелых интерпретаций, данных Резерфордом полученным им экспериментальным результатам; о значении резерфордовской модели атома, которая легла в основу всех современных представлений о свойствах атомов и молекул. В конце статьи говорится о большом внимании, которое Резерфорд постоянно уделял вопросам подготовки и подбора молодых ученых.

Капица П. Л. Воспоминания о проф. Э. Резерфорде.— «Успехи физ. наук», 1938, т. 19, вып. 1, стр. 1—17, портр.

Доклад, прочитанный в Университете физико-химии им. Н. Д. Зелинского в Москве 14 ноября 1937 года. Академик П. Л. Капица работал вместе с Резерфордом в Кевендишской лаборатории в продолжение 14 лет. В воспоминаниях вырисовывается глубоко характерный образ Резерфорда — выдающегося ученого, первоклассного научного руководителя, отзывчивого человека.

Эти воспоминания напечатаны также в кн.: Современные проблемы физико-химии и химической технологии. Сборник 2. М., Всесоюз. хим. о-во им. Д. И. Менделеева, 1938, стр. 3—20.

Шилов Н. А. Лаборатория проф. Резерфорда.— «Природа», 1914, июль—август, стлб. 979—986.

Автор этой статьи — видный советский химик (1872—1930), работавший в лаборатории Резерфорда в Манчестере. Статья дает живое представление о том, как была поставлена научная работа в лаборатории.

Иоффе А. Ф., Лазарев П. П., Стеклов В. А. Записка об ученых трудах профессора Эрнеста Рутерфорда.— «Известия Рос. акад. наук», 6 серия, 1922, т. 16, стр. 43.

К избранию Э. Резерфорда членом-корреспондентом Российской Академии наук.

Полак Л. С. Возникновение квантовой теории атома. (Модель атома Резерфорда—Бора).— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 19, стр. 431—449.

Лауэ М. История физики. Пер. с нем. Т. Н. Горнштейн. Под ред. и со статьей И. В. Кузнецова. М., Гостехиздат, 1956, стр. 122, 157 (модель атома), 128—129, 131—133 (радиоактивность).

ПОЛЬ ЛАНЖЕВЕН

(1872—1946)

Поль Ланжевен родился в Париже 23 января 1872 года, вскоре после жестокого подавления Парижской коммуны. Сын рабочего — убежденного республиканца, Ланжевен через всю свою большую жизнь пронес воспринятые им еще в детстве идеалы свободы и ненависть к насилию. В 1932 году он вместе с Анри Барбюсом и Роменом Ролланом организовал Амстердамский антифашистский комитет; в 1935 году участвовал в создании Народного фронта во Франции; в течение многих лет был членом, а в последние годы — председателем Лиги прав человека. Во время второй мировой войны Ланжевен принимал активное участие в борьбе против фашистских захватчиков. После освобождения Франции в 1944 году он вступил в ряды Французской коммунистической партии. Поль Ланжевен был одним из организаторов, а в последний год своей жизни — председателем общества «Франция—СССР».

В науке Ланжевен был убежденным материалистом. Еще в 1933 году в своей речи о развитии ядерной физики на Международном конгрессе физической химии он сказал: «Хотите вы или не хотите, но если пытаться что-нибудь понять в развитии науки, это можно сделать, только став на точку зрения диалектического материализма» [1].

Благодаря колоссальной эрудиции, плодотворным физическим идеям, которыми он вдохновлял ученых на новые и новые исследования, благодаря собственным важнейшим научным открытиям Поль Ланжевен в течение почти четырех десятилетий оставался в числе самых авторитетных деятелей физической науки.

С 1934 года Ланжевен был членом Парижской академии наук; с 1929 — иностранным членом-корреспондентом, а с 1945 — почетным членом Академии наук СССР. Он был также членом Лондонского королевского общества. В 1928 году Ланжевен сменил Г. А. Лоренца на посту

---

[1] «Вестник Акад. наук СССР», 1947, № 5, стр. 43.

председателя Сольвеевских международных конгрессов [1] и, кроме того, был избран президентом Научного совета, подготовлявшего эти конгрессы.

Почти всю свою долгую жизнь Поль Ланжевен провел в Париже. Учителями его были такие замечательные ученые, как Пьер Кюри в Школе физики и химии (1888—1891), М. Бриллюэн и Ж. Перрен — в Высшей нормальной школе (1893—1897).

Окончив Нормальную школу с высшей наградой — «стипендией города Парижа», Ланжевен отправился для продолжения образования в Кембридж, где в течение года (1897—1898) работал в Кевендишской лаборатории под руководством Дж. Дж. Томсона.

В 1898 году Ланжевен стал преподавателем физики в Парижском университете, а в 1902 году, после защиты докторской диссертации, был приглашен в одно из высших учебных заведений Франции — Коллеж де Франс, где в 1909 году стал профессором. Однако в основном педагогическая деятельность Ланжевена была связана со Школой физики и химии, в которой он еще в 1903 году сменил Пьера Кюри в должности преподавателя, а с 1925 года и до конца своей жизни занимал пост директора. Под руководством Ланжевена эта школа стала одним из ведущих высших учебных заведений Франции.

Как педагог Ланжевен пользовался исключительной популярностью, хотя слушателями его лекций в Коллеж де Франс зачастую были далеко не начинающие физики. В лекциях Ланжевен всегда проводил свою основную мысль — «понимать важнее, чем знать».

Среди научных достижений Ланжевена наибольшее значение имеют его классические работы по ионизации газов и новая теория магнетизма. Большим научным вкладом явились исследования Ланжевена в области пьезоэлектричества и в созданной им области физики — ультраакустики. Наконец, Ланжевену принадлежит ряд выдающихся работ по теории относительности, некоторым проблемам квантовой физики и физики атомного ядра.

Исследования по теории ионизации газов Ланжевен начал еще в Нормальной школе, увлеченный опытами Ж. Перрена по ионизации газов рентгеновскими лучами. Окончательный выбор творческого пути Ланжевен сделал после пребывания в Кевендишской лаборатории, которая благодаря работам Дж. Дж. Томсона в конце XIX — начале XX вв. стала центром изучения электрических явлений в газах. «Этот год,— писал впоследствии Ланжевен,— был решающим в ориентации моей научной деятельности». В результате теоретических и экспериментальных исследований Ланжевен установил важные закономерности движения как нейтральных, так и заряженных частиц (ионов) в газе. Он открыл существование так называемых тяжелых ионов, образующихся в результате оседания обычных, легких ионов на маленьких твердых и жидких частицах в газе и по массе своей в 1 000 раз превышающих обычные ионы. Показав на основе термодинамики невозможность существования ионов, промежуточных по массе между тяжелыми и обычными ионами, Ланжевен объяснил этим существование двух наблюдаемых видов обла-

[1] См. очерк о П. и М. Кюри.



Поль Ланжевен

ков (без наличия в земной атмосфере промежуточных видов), с характерными для каждого вида высотами над землей (разница составляет несколько километров). Ланжевен создал количественную теорию рекомбинации ионов в молекулы и вывел формулу для определения коэффициента рекомбинации, которую сам же проверил на опыте. Исследования по ионизации газов стали темой докторской диссертации Ланжевена (1902 г.).

Исключительно важное значение для современной физики имеет созданная Ланжевеном новая теория взаимной диффузии двух газов, сильно различающихся по массам составляющих их частиц. Эта теория, изложенная им в работе 1905 года «Об одной фундаментальной формуле кинетической теории газов», позволяет решить проблему разделения изотопов, что имеет чрезвычайно большое значение для получения атомной энергии.

В том же 1905 году вышла классическая работа Ланжевена «Магнетизм и теория электронов», в которой он дал электронную теорию диа- и парамагнетизма, обосновав ее термодинамически и впервые применив к изучению магнитных свойств вещества статистические методы. К исследованиям в области магнетизма Ланжевена привели замечательные экспериментальные открытия Пьера Кюри. Ланжевен теоретически обосновал выводы Кюри о независимости магнитной восприимчивости от температуры для диамагнетиков и об обратно пропорциональной зависимости ее от абсолютной температуры для парамагнетиков (закон Кюри). Широкое применение в современной теории ферромагнетиков получила введенная Ланжевеном функция зависимости магнитной восприимчивости вещества от температуры и внешнего магнитного поля (функция Ланжевена).

Ланжевен впервые теоретически объяснил загадочные свойства веществ, называемых диамагнетиками. Такие вещества обладают отрицательной магнитной восприимчивостью и не притягиваются, а отталкиваются полюсами магнита. Если палочку из диамагнетика свободно подвесить в магнитном поле, она устанавливается перпендикулярно к силовым линиям поля, тогда как обычные магнетики ориентируются вдоль поля. Явление диамагнетизма Ланжевен объяснил смещением электронных оболочек атома диамагнетика под действием внешнего магнитного поля. Отсюда он сделал вывод, что диамагнитными свойствами обладают все без исключения вещества, вплоть до ферромагнетиков, и только малая величина диамагнитного эффекта не позволяет во многих случаях его обнаружить.

Применение Ланжевеном статистических методов в области магнетизма привело в дальнейшем к созданию теории ферромагнетизма (немецкий физик Гейзенберг) и теории диэлектриков (голландский физик П. Дебай), что позволило непосредственно на опыте определять электрические и магнитные моменты отдельных молекул. Ланжевен дал также теоретическое объяснение явления Керра (изменение поляризации светового луча в электрическом и магнитном полях [1]). Наконец, в области

[1] Открыто шотландским физиком Д. Керром в 1875—1876 гг.

магнетизма Ланжевену принадлежит открытие так называемого магнитокалорического эффекта. Сущность этого эффекта заключается в том, что температура намагниченного тела при размагничивании несколько понижается (часть тепловой энергии тела идет на нарушение правильной ориентации его молекул). Относительная величина такого охлаждения мала при обычных температурах тела, но становится заметной, если тело предварительно сильно охлаждено. Использование магнитокалорического эффекта позволяет реализовать более низкие температуры, чем те, которые достигаются всеми другими известными в настоящее время способами.

В годы первой мировой войны Ланжевен провел важнейшие исследования по ультразвуку, продолжив тем самым работы, впервые начатые П. Н. Лебедевым. Он исключительно высоко ценил заслуги П. Н. Лебедева в этой области и называл впервые выведенную Максвеллом формулу давления «лучистой энергии» законом Максвелла — Лебедева. Интенсивность ультразвука Ланжевен предложил определять по силе механического давления.

Использовав большую скорость распространения звука в воде и резкую направленность ультразвуковых волн (ультразвукового луча), Ланжевен разработал метод подводной сигнализации и измерения глубин при помощи ультразвуковых волн. В качестве источника таких волн, он предложил прибор, состоящий из пластинок пьезокварца, помещенных (для увеличения амплитуды и силы колебаний) между двумя толстыми стальными пластинками и склеенных с ними. Этот так называемый пьезовибратор Ланжевена является мощным источником ультразвуковых волн с наиболее выгодной частотой колебаний (20—30 тыс. герц: волны более высокой частоты сильно поглощаются в воде). Ланжевен применил пьезовибратор в изобретенном им пьезокварцевом эхолоте — приборе для измерения глубин, на основе которого в годы второй мировой войны были сконструированы так называемые «сонары», или гидролокаторы.

Идеи Ланжевена в области ультразвука нашли широкое применение в самых различных отраслях техники, в частности, они привели к разработке важного в металлургии метода обнаружения дефектов в толще металлических изделий.

Еще в годы первой мировой войны Ланжевен провел важные исследования в области баллистики. Он вывел формулу, позволяющую определить отклонение действительной траектории снаряда от теоретически вычисленной.

В 1905 году Ланжевен начал свои исследования по теории относительности. Несколько раньше Эйнштейна он на основании расчета массы света по его давлению вывел — правда, для ряда частных случаев — знаменитую формулу связи массы и энергии ($E=mc^2$).

Большой заслугой Ланжевена в области как специальной, так и общей теории относительности являются его многочисленные доклады и статьи, а также проводившиеся по его инициативе и под его руководством дискуссии, где Ланжевен, глубоко проникнувший в идеи этих новых фи-

зических теорий, разъяснял, вскрывал материалистическую сущность нового учения о свойствах пространства и времени. Это было как раз в те годы, когда многие физики с опаской и недоверием относились к новой теории, опровергавшей фундаментальные представления классической физики. Особенно важны в этом отношении такие работы Ланжевена, как «Физика электронов», написанная еще в 1904 году, «Эволюция понятия пространства и времени» (1911 г.), «Время, пространство и причинность в современной физике» (1911 г.) и, наконец, его обобщающая работа о значении теории относительности как для физики, так и для философии — «Относительность» (1932 г.). Роль Ланжевена в развитии и пропагандировании идей теории относительности исключительно высоко ценил Эйнштейн, сказавший о Ланжевене: «Мне кажется вполне достоверным, что он построил бы специальную теорию относительности, если бы это не было сделано в другом месте,— настолько ясно он понимал все существенные пункты этой теории».

Поль Ланжевен умер 19 декабря 1946 года в Париже и был похоронен в Пантеоне — мавзолее великих людей Франции.

ТРУДЫ П. ЛАНЖЕВЕНА

Ланжевен П. Физика за последние двадцать лет. Пер. В. З. Курбатовой, под ред. акад. А. Ф. Иоффе и Я. Г. Дорфмана. Л., Науч. хим.-техн. изд., 1928. 261 стр.

Сборник составлен из ряда докладов, прочитанных Ланжевеном перед широкой аудиторией.

Содержание: Физика электронов. — Зерна электричества и динамика электромагнитная.—Кинетическая теория магнетизма и магнетоны. — Физика прерывности. — Эволюция пространства и времени.— Время, пространство и причинность в современной физике. — Инерция энергии и ее следствия. — Дальнейшее развитие принципа относительности. — О научном образовании.

Ланжевен П. Избранные произведения. Статьи и речи по общим вопросам науки. Пер. с франц. З. А. Цейтлина. Вступит. статья А. А. Максимова. Ред. И. В. Кузнецова.— М., Изд. иностр. лит., 1949. 438 стр.

В эту книгу вошли все статьи предыдущего сборника (в новых переводах) и, кроме того, ряд других статей и речей 1932—1946 гг.: «Относительность», «Атомы и корпускулы», «Современная физика и детерминизм», «Эра атомной энергии», «Мысль и действие».

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ П. ЛАНЖЕВЕНА

Ландсберг Г. С. Ланжевен Поль.— БСЭ, 2-е изд., т. 24, 1953, стр. 279—280, портр.

Волгин В. П. Памяти Поля Ланжевена.—«Вестник Акад. наук СССР», 1947, № 1, стр. 124.

Ландсберг Г. С. Поль Ланжевен. (1872—1946).— «Успехи физ. наук», 1947, т. 31, вып. 3, стр. 289—296, портр.

Памяти Поля Ланжевена.— «Вестник Акад. наук СССР», 1947, № 5, стр. 39—47.

Информация о заседании Отделения физико-математических наук Академии наук СССР, Физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР и физического факультета Московского гос. университета. Приведено краткое содержание докладов С. И. Вавилова, Г. С. Ландсберга, А. Ф. Иоффе, Я. И. Френкеля и др.

Гейвиш Ю. Г. Поль Ланжевен — ученый, борец за мир и демократию. М., Акад. наук СССР, 1955. 127 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Ин-т философии).

Очерк научной, педагогической и общественной деятельности.

Главы книги: Жизненный путь Поля Ланжевена. — Философские взгляды Поля Ланжевена. — Поль Ланжевен — педагог и общественный деятель.

Максимов А. А. Поль Ланжевен — физик-материалист.— В кн.: Ланжевен П. Избранные произведения. М., Изд. иностр. лит., 1949, стр. 5—35.

Гейвиш Ю. Г. Поль Ланжевен — выдающийся французский физик-материалист. (К выходу в свет русского перевода «Избранных произведений).— «Успехи физ. наук», 1950. т. 42, вып. 3, стр. 462—475.

Старосельская-Никитина О. А. Работы Поля Ланжевена в области пьезоэлектричества и ультразвука.—«Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР]. 1957, т. 19, стр. 170—196.

* *
*

Деятельности Ланжевена в области создания и укрепления научных и культурных связей Франции и СССР, его интересу к истории развития русской дореволюционной и советской науки посвящена статья:

Старосельская-Никитина О. А. Поль Ланжевен и франко-советские культурные связи.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 1, стр. 66—70.

В статье публикуется текст рукописи П. Ланжевена «Интеллектуальная деятельность и Россия», представляющая собой набросок вводной части его речи, посвященной возобновлению культурных связей с Россией непосредственно после Великой Октябрьской социалистической революции.

МАРИАН СМОЛУХОВСКИЙ

(1872—1917)

Польский физик Мариан Смолуховский родился 28 мая 1872 года. Окончив в 1894 году Венский университет, Смолуховский продолжал изучение физики в крупнейших научных центрах Европы: в Париже (1895—1896) он занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями в области теплового излучения тел; в Глазго (1896—1897) работал над вопросами радиоактивности, а также над вопросами проводимости газов, в лаборатории У. Томсона (Кельвина); в Берлинском университете Смолуховский в 1897 году начал исследование вопроса о распределении температуры в разреженных газах, что привело его позже к важным открытиям в этой области. Возвратившись в том же году в Вену, Смолуховский вскоре был приглашен в Львовский университет, где с 1900 по 1913 гг. был профессором по кафедре теоретической физики, а затем и ректором университета. В 1913 году он занял кафедру экспериментальной физики, а затем и пост ректора в Краковском университете. В Львовском и Краковском университетах Смолуховский провел классические исследования по кинетической теории материи (механической теории теплоты). В этих работах Смолуховского нашли полное подтверждение и получили дальнейшее развитие статистические идеи Больцмана и его идея флюктуаций (см. очерк: Людвиг Больцман).

Первыми работами Смолуховского в этой области были его исследования по теории броуновского (или брауновского, как иногда говорят) движения, которые он вел независимо от Эйнштейна.

Открытое в 1827 году английским ботаником Робертом Броуном беспорядочное движение частичек цветочной пыльцы в воде, получившее название броуновского движения, долгое время оставалось необъясненным. Впоследствии броуновское движение было обнаружено и для частиц, взвешенных в газе. Попытки объяснить это явление воздействиями внешних причин — света, конвекционных токов в жидкости или газе, сотрясений — потерпели полную неудачу, так как броуновское движение обнаруживалось даже в сосудах, долгие месяцы сохранявшихся в максимальной



Мариан Смолуховский

изоляции от внешних воздействий. С появлением механической теории теплоты некоторые ученые высказывали мысль о том, что причиной броуновского движения является тепловое движение молекул. Однако лишь в начале XX века Эйнштейн (1905 г.) и Смолуховский (1906 г.), исходя из аналогичных представлений, создали полную количественную теорию броуновского движения, установив статистический характер законов этого явления.

Смолуховский показал, что броуновское движение частиц служит наглядным проявлением флюктуационного характера таких процессов в природе, в которых участвует большое число хаотически движущихся в общем независимых однородных тел.

Действительно, взвешенная в воде твердая частица одновременно получает удары от большого числа молекул воды. На сравнительно большую частицу в каждый данный момент времени этих ударов приходится так много, что разница в их числе с одной какой-либо стороны и с противоположной, неизбежно имеющаяся в силу хаотичности движений молекул, не влияет на положение частицы: равнодействующая всех ударов будет в этом случае в среднем равна нулю. Однако при достаточно малых размерах броуновской частицы разница в числе ударов с той или другой стороны, а следовательно, и разница в величине сил, действующих на броуновскую частицу с разных сторон, приобретает большое относительное значение, так как общее число одновременных ударов в случае маленькой частицы сравнительно невелико. Поэтому частица движется в сторону действия наибольшей в данный момент времени результирующей силы.

Позднее, в 1912 году Смолуховский указал, что хаотическое тепловое движение молекул должно сказываться и на показаниях очень чувствительных физических приборов: под действием флюктуаций теплового движения молекул самой стрелки прибора стрелка не может оставаться неподвижной и неизбежно будет колебаться около некоторого среднего положения, т. е. находиться в своеобразном броуновском движении. Этот факт имеет большое значение в экспериментальной физике, так как указывает на существование объективного предела точности измерений для любого сколь угодно чувствительного прибора, с помощью которого измеряются «средние» величины, как, например, сила и напряжение тока, температура и т. п.

На основе теории флюктуаций Смолуховский объяснил явление критической опалесценции — помутнения газа в жидкости вблизи критической температуры, показав, что это явление возникает вследствие резкого возрастания вблизи критической температуры флюктуаций плотности в газах и жидкостях (отчего сильно увеличивается боковое рассеяние коротковолнового света).

Разработанная Эйнштейном и Смолуховским теория броуновского движения была блестяще подтверждена в первой четверти XX века главным образом в экспериментальных исследованиях известного французского физико-химика Ж. Перрена, шведского физико-химика Т. Сведберга и др.

В 1912—1916 гг. Смолуховский сделал ряд докладов в гг. Мюнстере и Геттингене, в которых подтвердил и развил идеи Больцмана о принци-

пиальной обратимости всех процессов в природе и об ограниченной применимости второго начала термодинамики. В формулировке Смолуховского оно гласит: «Теплота не может в течение *продолжительного времени* (курсив мой,—*С. Е.*) сама собою переходить от более холодного тела к более нагретому», или иначе: «нельзя построить автоматически действующую машину, потребляющую теплоту более низкой температуры, которая в течение *продолжительного времени* (курсив мой, — *С. Е.*) представляла бы источник полезной работы конечной мощности» [1].

Тем самым Смолуховский окончательно показал, что молекулярно-кинетические представления не противоречат термодинамическим законам. Такое понимание второго начала считается в настоящее время общепризнанным.

Последние три года своей жизни Смолуховский занимался теоретическими исследованиями в области коллоидной химии, изучающей свойства особых, дисперсных [2] систем. Создание Эйнштейном и Смолуховским теории броуновского движения открыло новый этап в развитии этой важной области физической химии. Смолуховский развил на этой основе статистическую теорию эмульсий — дисперсных систем, в которых взвешенными являются частицы некоторой жидкости, и чрезвычайно важную теорию слипания (коагуляции) частиц в коллоидных растворах, т. е. в системах, промежуточных между обычными растворами и так называемыми грубодисперсными (эмульсии, суспензии) системами.

Умер Смолуховский в Кракове 5 сентября 1917 года.

ТРУДЫ М. СМОЛУХОВСКОГО

Смолуховский М. Исследования о броуновском движении в молекулярной статистике.—В кн.: Второе начало термодинамики. Сади Карно.— В. Томсон-Кельвин.— Р. Клаузиус.— Л. Больцман.— М. Смолуховский. Под ред. и с предисл. А. К. Тимирязева. М. — Л., Гостехтеоретиздат, 1934, стр. 229—292.

В сборник вошли следующие работы М. Смолуховского: Несколько примеров броуновского молекулярного движения под влиянием внешних сил. — Молекулярная статистика эмульсий и ее связь с броуновским движением.— Молекулярно-теоретические исследования по вопросу об обращении термодинамически необратимых процессов и о повторении аномальных состояний.— О броуновском молекулярном движении под влиянием внешних сил и его связи с обобщенным уравнением диффузии.

Перевод В. С. Гохмана. Примечания А. К. Тимирязева.

Броуновское движение. А. Эйнштейн. — М. Смолуховский. Сборник статей. Пер. К. И. Федченко. Под ред. Б. И. Давыдова. С доп. статьями Ю. А. Круткова и Б. И. Давыдова. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1936. 607 стр., портр.

Помимо работ, вошедших в предыдущий сборник, в настоящую книгу включены еще следующие работы М. Смолуховского: Средний путь газовых молекул и его связь с теорией диффузии. — К кинетической теории брауновского молекулярного движения

---

[1] Броуновское движение. А. Эйнштейн, М. Смолуховский. Сборник статей. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1936, стр. 203.

[2] Дисперсной называют физическую систему, представляющую собою тела малого размера, взвешенные в некоторой жидкой среде.

и суспензий. — Доступные наблюдению молекулярные явления, противоречащие обычной термодинамике. — Границы применимости второго начала теории теплоты. — «О среднем максимальном отклонении» при броуновском молекулярном движении в опытах Бриллюэна. — Замечание о расчете броуновского молекулярного движения в опытах Эренхафта — Милликэна. — Три доклада о диффузии, броуновском молекулярном движении и коагуляции коллоидных частиц.

Смолуховский М. О понятии случайности и происхождении законов вероятности в физике. — «Успехи физ. наук», 1927, т. 7, вып. 5, стр. 329—349.

То же: «Под знаменем марксизма», 1927, № 9, стр. 149—162.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ М. СМОЛУХОВСКОГО

Смолуховский Мариан (1872—1917). — БСЭ, 2-е изд., т. 39, 1956, стр. 425—426, портр.

Блох М. А. Биографический справочник. Выдающиеся химики и ученые XIX и XX столетий, работавшие в смежных с химией областях науки. Т. 2. Л., Гос. науч.-техн. изд., 1931, стр. 693—695.

Тимирязев А. К. Мариан Смолуховский. — В кн.: Второе начало термодинамики. Под ред. и с предисл. А. К. Тимирязева. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1934, стр. 311.

Мариан Смолуховский. — В кн.: Броуновское движение. А. Эйнштейн. — М. Смолуховский. Сборник статей. М.—Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1936, стр. 417—418.

Краткие биографические справки.

Анри В. М. Смолуховский. (Некролог). — «Успехи физ. наук», 1918, т. 1, стр. 67—70.

Мариан Смолуховский. (К десятилетию со дня смерти). Подпись: Б. Г. «Под знаменем марксизма», 1927, № 9, стр. 144—148.

Краевский В. Борьба Мариана Смолуховского за научную атомистику. — «Вопросы философии», 1956, № 4, стр. 104—117.

То же в кн.: Философские вопросы современной физики. Под ред. И. В. Кузнецова и М. Э. Омельяновского. М., Госполитиздат, 1958, стр. 191—221.

Главы статьи: 1. Борьба материализма с идеализмом вокруг вопроса о реальности атомов. 2. В поисках доказательств. Теория флюктуаций Смолуховского. 3. Непосредственные доказательства. Анализ опытов Сведберга. 4. Броуновское движение. Анализ опытов Перрена. 5. Истолкование второго принципа термодинамики. 6. Критика теории «тепловой смерти» мира.

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ РОЖДЕСТВЕНСКИЙ

(1876—1940)

Дмитрий Сергеевич Рождественский — выдающийся физик, автор классических трудов в области физической и инструментальной оптики, глава советской оптической школы — родился 7 апреля 1876 года в Петербурге. В 1900 году он окончил Петербургский университет, а с 1916 года в течение почти четверти века был профессором этого университета. Для пополнения образования Д. С. Рождественский ездил за границу, где сначала работал в лабораториях известных немецких физиков-оптиков Винера (1901 г.) и П. Друде (1903 г.), а затем в Парижском университете (1907—1910).

Рождественский начал свои научные исследования в Петербургском университете, выбрав для этого одну из наиболее сложных проблем физической оптики — проблему аномальной дисперсии света.

Явление аномальной дисперсии света открыл в 1862 году французский физик Ле-Ру. Оно заключается в том, что в преломляющих средах, имеющих полосу поглощения в некоторой области спектра, показатель преломления в районе этой полосы не увеличивается с уменьшением длины световой волны, как при нормальной дисперсии, а находится в сложной зависимости от длины волны и в общем имеет обратный ход, т. е. он больше для красных лучей, чем для фиолетовых.

Если полоса поглощения находится в видимой области спектра, то явление наблюдается в виде характерного искажения картины спектра при пропускании света через две скрещенные под прямым углом призмы, одна из которых состоит из вещества, имеющего полосу поглощения.

В XIX веке появились различные теории аномальной дисперсии; теоретически была выведена формула зависимости показателя преломления от длины волны для аномальной дисперсии (немецкий физик Вильгельм Зельмейер, 1871 г.). Однако экспериментально количественно изучить явление аномальной дисперсии до работ Рождественского не удавалось. Единственный известный в то время метод наблюдения этого явления —

предложенный А. Кундтом метод скрещенных призм (расположенных так, что угол между их ребрами составлял 90°) — не позволял производить точных измерений.

Рождественокий разработал новый, оригинальный и непревзойденный до наших дней метод количественного изучения аномальной дисперсии — метод скрещенных интерферометра и спектрографа, или «метод крюков». При пропускании света через исследуемое вещество и через эту установку на экране получается интерференционная картина, имеющая резко выраженный характерный «крюкообразный» вид в области аномальной дисперсии, что как раз и позволяет производить в этой исключительно трудной для наблюдения области высокоточные измерения.

При помощи метода «крюков» Д. С. Рождественский исследовал коэффициент преломления в зависимости от длины волны, причем не только в непосредственной близости от полосы поглощения (в парах натрия), но и внутри этой полосы. До опытов Д. С. Рождественского это считалось экспериментально неосуществимым. Опыты с парами натрия полностью подтвердили формулу Зельмейера.

О результатах своих работ Рождественский доложил в декабре 1909 года на заседании Русского физико-химического общества. В 1912 году Рождественский защитил магистерскую диссертацию «Исследование аномальной дисперсии в парах натрия», которая была удостоена Менделеевской медали Академии наук. Полученный Рождественским фотографический снимок картины аномальной дисперсии до сих пор не имеет себе равных и приводится в каждом курсе оптики.

К теме аномальной дисперсии Д. С. Рождественский вернулся в последние годы своей жизни, когда вместе со своими учениками исследовал это явление в парах тугоплавких металлов (хрома и ряда других). Огромные экспериментальные трудности и здесь были блестяще преодолены.

Работы по аномальной дисперсии привели Рождественского к изучению строения атомов по их спектрам. Исследовав аномальную дисперсию в спектрах щелочных металлов (калия, рубидия, цезия), он обнаружил, что интенсивности линий в спектрах металлов относятся как целые числа. Глубокий физический смысл этой закономерности был вскрыт позднее при помощи теории квантов. Эти исследования стали темой докторской диссертации Рождественского, которую он защитил в 1915 году. В том же году он был избран директором Физического института при университете, а вскоре и профессором Петроградского университета.

Основные работы по изучению строения атомов были проведены Рождественским в 1919 — начале 1920 гг., в труднейшие годы полной блокады Советской России. Опираясь на теорию атома, предложенную Н. Бором, Рождественский объяснил спектры некоторых ионизированных металлов и показал, что спектр ионизированного атома элемента должен иметь сходство со спектром элемента, предшествующего ему в периодической таблице элементов. Это еще раз доказывало глубочайший физический смысл периодического закона Менделеева. Одним из первых Рождественский высказал верную мысль о магнитном происхождении дублетов и триплетов в спектрах атомов.



Дмитрий Сергеевич Рождественский

Следует отметить также чрезвычайно важные работы Рождественского по теории микроскопа, которым он посвятил последние пять лет своей жизни. Он развил новую теорию изображения в микроскопе, впервые указав в работах 1939—1940 гг. на важную роль интерференции в образовании изображения.

Научные заслуги Рождественского были отмечены избранием его в 1925 году членом-корреспондентом, а в 1929 — действительным членом Академии наук СССР.

Большую роль в развитии советской науки сыграл Д. С. Рождественский и как педагог, под руководством которого выросла самая крупная в СССР школа физиков-оптиков (свыше 50 известных ученых).

При ближайшем участии Рождественского была создана советская оптическая промышленность. Он был также инициатором и непосредственным участником организации Государственного оптического института (ГОИ) в Ленинграде, в котором в течение 14 лет (1918—1932) занимал пост директора и научного руководителя.

Умер Д. С. Рождественский 25 июня 1940 года.

ТРУДЫ Д. С. РОЖДЕСТВЕНСКОГО

Рождественский Д. С. Работы по аномальной дисперсии в парах металлов. Под ред. чл.-корр. АН СССР С. Э. Фриша, с примеч. Н. П. Пенкина. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951. 394 стр., илл., портр. (Классики науки).

Содержание: Аномальная дисперсия в парах натрия.— Простые соотношения в спектрах щелочных металлов.—Интерферометры для исследования аномальной дисперсии.— Определение сил вибраторов в спектрах атомов.

Последняя работа выполнена совместно с И. П. Пенкиным. В настоящем виде была опубликована впервые. В несколько сокращенном изложении работа была напечатана в «Известиях Академии наук СССР. Серия физ.», 1941, № 6, стр. 635—656.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Д. С. РОЖДЕСТВЕНСКОГО

Рождественский Дмитрий Сергеевич (1876—1940). — БСЭ, 2-е изд., т. 36, 1955, стр. 616, портр.

Вавилов С. И. Очерк развития физики в Академии наук за 220 лет.— В кн.: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 3. Работы по философии и истории естествознания. М., Акад. наук СССР, 1956, стр. 548—549.

Краткий обзор исследовательской и научно-организаторской деятельности Д. С Рождественского.

Вавилов С. И. Академик Д. С. Рождественский.— «Оптико-механ. пром.», 1940, № 6—7, стр. 6—7, портр.

Кравец Т. П. Памяти акад. Д. С. Рождественского.— «Вестник Акад. наук СССР», 1940, № 10, стр. 78—80, портр.

Баумгарт К. К. Академик Дмитрий Сергеевич Рождественский (1876—1940).— «Физика в школе», 1948, № 6, стр. 14—20.

Баумгарт К. К. Дмитрий Сергеевич Рождественский.— «Успехи физ. наук», 1941, т. 25, вып. 2, стр. 230—240, портр.

Очерк жизни и деятельности. Хронологические даты главнейших событий из жизни Д. С. Рождественского.

Фриш С. Э. Дмитрий Сергеевич Рождественский. (К 75-летию со дня рождения).— «Успехи физ. наук», 1951, т. 44, вып. 2, стр. 238—254, портр.

Фриш С. Э. Д. С. Рождественский. (Жизнь и деятельность).— В кн.: Рождественский Д. С. Работы по аномальной дисперсии в парах металлов. М.—Л., Акад. наук СССР, 1951, стр. 369—384.

Несколько видоизмененная редакция предыдущей статьи того же автора.

Фриш С. Э. Дмитрий Сергеевич Рождественский. Жизнь и деятельность. Л., 1954. 27 стр.; 1 л. портр. (Ленингр. гос. ун-т им. А. А. Жданова).

Отдельные стороны творчества Д. С. Рождественского освещены в статьях:

Фриш С. Э. и **Баумгарт К. К.** Академик Д. С. Рождественский и Ленинградская школа оптиков.— «Вестник Ленингр. ун-та», 1946, № 2, стр. 116—122.

Баумгарт К. К. Профессор Университета Дмитрий Сергеевич Рождественский — основатель Государственного оптического института. Доклад на девятых чтениях им. акад. Д. С. Рождественского (12 мая 1955 г.).— Труды Гос. ордена Ленина оптического института им. С. И. Вавилова, 1957, т. 24, вып. 147 и 148, стр. 65—73.

Кватер Г. С. Работа академика Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1941, № 6, стр. 611—621.

Тренин А. Н. и **Фриш С. Э.** Работы Д. С. Рождественского и его школы по аномальной дисперсии в парах металлов.— В кн.: Юбилейный сборник, посвященный 30-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Т. 1. М.—Л., Акад. наук СССР, 1947, стр. 360—376, портр.

Фаерман Г. П. Анализ спектра и спектральный анализ. (Доклад акад. Д. С. Рождественского).— «Природа», 1936, № 5, стр. 27—37.

Гальперн Д. Ю. Работы академика Д. С. Рождественского по микроскопии.— Труды Гос. ордена Ленина оптического ин-та им. С. И. Вавилова, 1953, т. 23, вып. 138, стр. 15—21.

Линник В. П. Работы академика Д. С. Рождественского в области микроскопии.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1941, № 6, стр 622—630.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Баумгарт К. К. Список трудов Д. С. Рождественского.— «Успехи физ. наук», 1941, т. 25, вып. 2, стр. 237—240 (в статье К. К. Баумгарт «Дмитрий Сергеевич Рождественский»).

1. Научные исследования. 2. Главы и статьи в больших курсах физики и химии и редакционные статьи. 3. Обзоры и популярные статьи. 4. Речи, лекции, докладные записки принципиального характера. Всего — 77 названий.

Фриш С. Э. Список основных трудов Дмитрия Сергеевича Рождественского.— «Успехи физ. наук», 1951, т. 44, вып. 2, стр. 253—254 (в статье С. Э. Фриш «Дмитрий Сергеевич Рождественский»).

ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ

(1879—1944)

Работы выдающегося советского физика Леонида Исааковича Мандельштама посвящены главным образом физической оптике, теории колебаний и радиофизике.

Л. И. Мандельштам родился 4 мая 1879 года в г. Могилеве. Уже в гимназии, которую он окончил с медалью, проявились его большие способности к математике. Проучившись один год (1897) в Новороссийском университете в Одессе, он за участие в студенческих волнениях был исключен из него и закончил свое образование в Страсбургском университете (1899—1902).

После защиты в 1902 году диссертации на степень доктора натуральной философии (физики) Л. И. Мандельштам работал ассистентом по радиотелеграфии в Страсбурге и Берлине, а затем был доцентом по физике (с 1907 г.) и профессором (с 1913 г.) в Физическом институте при Страсбургском университете. Возвратившись в 1914 году в Россию, Мандельштам некоторое время (1915 г.) состоял приват-доцентом Новороссийского университета, затем профессором физики в Политехнических институтах в Тифлисе (1917 г.) и в Одессе (1918—1922 гг.). В годы гражданской войны Л. И. Мандельштам, кроме того, был научным консультантом на радиотелеграфных заводах (Петроград, Одесса, Москва) и в Радиолаборатории (впоследствии Центральной радиолаборатории) Электротехнического треста заводов слабого тока в Москве и Петрограде.

С 1925 года начинается обширная педагогическая и научная деятельность Л. И. Мандельштама в качестве профессора теоретической физики Московского государственного университета. В 1928 году он был избран членом-корреспондентом, а через год действительным членом Академии наук СССР.

Уже первые научные работы Л. И. Мандельштама — по теории колебаний и радиотехнике (1903—1914), разработанные им весьма точные методы измерения частоты и затухания высокочастотных электромагнитных

колебаний, изобретения в области радиосвязи принесли ему известность. В дальнейшем (30-е годы) в области радиофизики Мандельштам работал в тесном сотрудничестве с видным советским физиком Н. Д. Папалекси (1880—1947).

Работами Мандельштама и Папалекси было создано новое направление в физике — учение о нелинейных колебаниях, нашедшее широкое применение не только в радиотехнике, но и в акустике, механике, электротехнике.

Учение о нелинейных колебаниях лежит в основе теории автоколебаний, т. е. незатухающих колебаний, которые поддерживаются за счет источника энергии, имеющегося в самой колеблющейся системе (например, ламповые генераторы, часы, паровая машина и др.). Теория таких колебаний была разработана Мандельштамом, Папалекси и другими советскими физиками. На основе теории нелинейных колебаний Мандельштам и Папалекси открыли новые способы возбуждения электромагнитных колебаний, создали ряд новых радиоустройств. В период после 1937 года Мандельштам и Папалекси разработали конструкцию радиоинтерференционных дальномеров, получивших широкое применение в геодезии и гидрографии.

Параллельно с работами по радиофизике и теории колебаний Мандельштам вел свои исследования по физической оптике, именно по теории рассеяния света. В 1907 году в своем труде «Об оптически однородных и мутных средах» он вскрыл ошибочность теории рассеяния света английского физика Рэлея (1871 г.). Рэлей утверждал, что свет должен рассеиваться даже в однородной среде, исключительно за счет теплового движения молекул среды, которое якобы уже нарушает оптическую ее однородность. Теоретическими и экспериментальными исследованиями Мандельштам показал, что отдельные молекулы, независимо от того, движутся они или нет, не могут нарушить оптическую однородность среды и таким образом вызвать рассеяние света, так как для этого размеры неоднородностей должны быть сравнимы с длиной волны падающего света и, следовательно, много больше размеров одной молекулы. Мандельштам сделал вывод, что оптическая однородность в случае молекулярного рассеяния нарушается за счет молекулярного строения самой среды, где молекулы то в одном, то в другом месте могут сгущаться или разрежаться, изменяя таким образом показатель преломления (нарушая оптическую однородность) среды. Действительно, в работах М. Смолуховского того же года о броуновском движении было доказано, что вследствие теплового движения молекул в однородной среде неизбежно возникают флюктуации плотности, чем и нарушается оптическая однородность среды и что вызывает ее помутнение, особенно сильное вблизи критической температуры для данного вещества. Подтвержденная вскоре экспериментально (в работах Ж. Перрена, Т. Сведберга и др.) теория Смолуховского в свою очередь явилась подтверждением и обоснованием выводов Мандельштама. Именно на основании теории флюктуаций Мандельштам в 1913 году разработал более точную теорию молекулярного рассеяния света на поверхности раздела двух сред [1].

[1] Теорию молекулярного рассеяния света внутри среды дал А. Эйнштейн.



Леонид Исаакович Мандельштам

Продолжая эти исследования, он в период 1918—1926 гг. установил (как и независимо от него Бриллюэн в 1922 г.), что при молекулярном рассеянии монохроматического света последний должен несколько изменяться по частоте, так что спектральная линия рассеянного света должна приобретать сложную, так называемую тонкую структуру. По теории Мандельштама, причиной такого эффекта (получившего название эффекта Мандельштама—Бриллюэна) является воздействие на падающую волну света особых тепловых волн в веществе [1]. Существование эффекта Мандельштама — Бриллюэна окончательно было подтверждено в опытах Е. Ф. Гросса (1930 г.).

В 1928 году Л. И. Мандельштам совместно с Г. С. Ландсбергом опубликовали выдающееся открытие в области физической оптики. Они открыли явление комбинационного рассеяния [2]. Оказалось, что в результате молекулярного рассеяния длина волны падающего света характерным образом изменяется, причем эти изменения ее значительно превышают изменения за счет эффекта Мандельштама—Бриллюэна. В спектре рассеянного света при этом около «основной» линии с длиной волны падающего света появляется целый набор новых, близких к основной, линий-спутников с так называемыми комбинационными частотами. Свет с новыми, комбинационными частотами подчиняется определенным законам, в частности, он всегда определенным образом поляризован. Но важнейшая закономерность явления заключается в том, что величины разностей между основной и комбинационными частотами не зависят от частоты падающего света и определяются только природой самих молекул рассеивающего вещества (см. также очерк о Г. С. Ландсберге).

На основе явления комбинационного рассеяния света впоследствии был разработан чрезвычайно ценный метод исследования молекулярной структуры и химического состава вещества, который нашел широкое применение особенно в органической и физической химии.

Л. И. Мандельштаму принадлежат также важные работы в области инструментальной оптики (теория микроскопии).

Кроме оптических исследований и исследований по радиофизике, Мандельштам плодотворно занимался вопросами статистической и квантовой физики, а также вопросами теории относительности.

Наряду с этими теоретическими работами Мандельштаму принадлежит ряд важных изобретений в области радиофизики и оптики (микроскопии).

Вклад Л. И. Мандельштама в науку не исчерпывается его собственными научными работами. Исключительно большую роль в развитии науки в нашей стране сыграла его педагогическая деятельность, которая была

---

[1] Имеются в виду затухающие упругие колебания плотности, возникающие при «рассасывании» флюктуационных сгущений молекул. Эффект изменения частоты колебаний в падающем луче света является результатом модулирования этого луча указанными тепловыми волнами.

[2] Аналогичное открытие для жидкостей было опубликовано индийским физиком В. Раманом на несколько недель раньше. Раман получил за него Нобелевскую премию. В зарубежной литературе явление называется эффектом Рамана.

для него неотделима от деятельности научной. С самого начала его преподавательской работы вокруг Мандельштама группировались молодые талантливые физики — его ученики. Он руководил многочисленными научными работами в области оптики, учения о колебаниях, молекулярной физики, теории относительности. Под руководством Мандельштама в Московском университете возникла и оформилась новая крупная научная школа — школа по изучению нелинейных колебаний и рассеяния света. Из этой школы вышли многие видные советские физики — академики А. А. Андронов и М. А. Леонтович, профессора С. Э. Хайкин, Г. М. Горелик, С. М. Рытов и др. Учениками Мандельштама были также крупные советские физики — академики И. Е. Тамм и недавно скончавшийся Г. С. Ландсберг.

В последние годы жизни Л. И. Мандельштам, несмотря на тяжелую болезнь (грудная жаба), деятельно руководил подготовкой к печати сборника «Из предистории радио», вышедшего уже после смерти ученого.

Л. И. Мандельштам умер 27 ноября 1944 года в Москве.

Научные заслуги его неоднократно отмечались премиями, в том числе премией имени В. И. Ленина (1931 г.— за работы по комбинационному рассеянию) и 1-й Менделеевской премией по физике (1936 г.— за исследования по теории нелинейных колебаний).

В 1945 году были учреждены две премии имени Л. И. Мандельштама за лучшие работы в области радио и физики.

ТРУДЫ Л. И. МАНДЕЛЬШТАМА

Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. Под ред. проф. С. М. Рытова. Т. 1—5. М., Акад. наук СССР, 1947—1955.

Т. 1. Ред. проф. С. М. Рытова. 1948. 352 стр.; 6 л. илл. и портр.

Т. 2. Ред. проф. С. М. Рытова. 1947. 396 стр.; 4 л. илл. и портр.

Т. 3. Ред. проф. С. М. Рытова. 1950. 423 стр.; 1 л. портр.

Т. 4. Ред. акад. М. А. Леонтовича. 1955. 511 стр. с илл.

Т. 5. Ред. акад. М. А. Леонтовича. 1950. 468 стр. с илл.

В первые два тома вошли научные работы по разным вопросам, выполненные Л. И. Мандельштамом за время с 1902 по 1931 гг. (том первый) и с 1931 по 1944 гг. (том второй).

Содержание третьего тома составляют доклады Л. И. Мандельштама, его популярные статьи, статьи методического характера, а также впервые опубликованные в этом томе работы, относящиеся к разным периодам его творчества. В приложении к тому приводятся: 1) Список работ, выполненных под непосредственным руководством или по предложению Л. И. Мандельштама (100 назв. за период с 1918 по 1949 гг.), 2) Литература о Л. И. Мандельштаме (12 назв. за время с 1928 по 1948 гг.).

В четвертый том вошел курс теории колебаний, читанный Л. И. Мандельштамом в Московском университете в 1930—1932 гг., затем «Лекции по колебаниям», опубликованные здесь впервые.

Пятый том составляют лекции и семинары Л. И. Мандельштама по оптике, квантовой механике, теории колебаний и др., проведенные в Московском университете в 1932—1944 гг.

Мандельштам Л. И. Лекции по колебаниям. (1930—1932 гг.). Под ред. акад. М. А. Леонтовича. М., 1955. 504 стр. с черт. (Акад. наук СССР).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Л. И. МАНДЕЛЬШТАМА

Мандельштам Леонид Исаакович (1879—1944).— БСЭ, 2-е изд., т. 26, 1954, стр. 203—304, портр.

Хайкин С. Э. и **Ландсберг Г. С.** Леонид Исаакович Мандельштам (1879—1944).— В кн.: Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948, стр. 260—271.

Большой интерес представляют биографические работы о Л. И. Мандельштаме, автором которых является его друг и постоянный сотрудник академик Н. Д. Папалекси:

Папалекси Н. Д. Краткий очерк жизни и научной деятельности Леонида Исааковича Мандельштама.— «Известия Акад. наук СССР, серия физ.», 1945, № 1—2, стр. 8—20, портр.

То же в кн.: Папалекси Н. Д. Собрание трудов. М., Акад. наук СССР, 1948, стр. 224—240.

Папалекси Н. Д. Леонид Исаакович Мандельштам. (Краткий очерк о жизни и деятельности).— В кн.: Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. Т. 1. Л., Акад. наук СССР. 1948, стр. 7—66 с илл. и портр.

Папалекси Н. Д. Из научных воспоминаний о Леониде Исааковиче Мандельштаме.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1946, т. 10, № 2, стр. 127—134.

То же в кн.: Папалекси Н. Д. Собрание трудов. М., Акад. наук СССР, 1948, стр. 375—383.

* *
*

Характеристику отдельных направлений научной деятельности Л. И. Мандельштама читатель найдет в следующих работах:

Тамм И. Е. О работах Л. И. Мандельштама в области теоретической физики.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 56—60.

Ландсберг Г. С. Исследования Л. И. Мандельштама в области оптики и молекулярной физики.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 21—29.

Андронов А. А. Л. И. Мандельштам и теория нелинейных колебаний.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 30—55.

Рытов С. М. Л. И. Мандельштам и учение о модуляции.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 77—87, илл.

Горелик Г. С. Л. И. Мандельштам и учение о резонансе.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 61—76, илл.

Головин Г. И. Корифей советской радиофизики.— «Природа», 1950, № 3, стр. 79—84, портр.

Папалекси Н. Д. О деятельности академика Л. И. Мандельштама в области радиофизики и радиотехники.— «Электричество», 1945, № 1—2, стр. 44—45.

То же в кн.: Папалекси Н. Д. Собрание трудов. М., Акад. наук СССР, 1948, стр. 241—246.

Щеголев Е. Я. Академик Л. И. Мандельштам — радиоинженер.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 88—96, илл.

Горелик Г. С. Л. И. Мандельштам и преподавание физики.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1946, № 2, стр. 135—140.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Хронологический указатель опубликованных трудов Л. И. Мандельштама.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1945, т. 9, № 1—2, стр. 129—132.

В указателе перечисляются труды, появившиеся в печати за время с 1902 по 1944 г.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

(1879—1955)

Альберт Эйнштейн — величайший физик мира со времен Ньютона. В. И. Ленин назвал Эйнштейна одним из великих преобразователей естествознания.

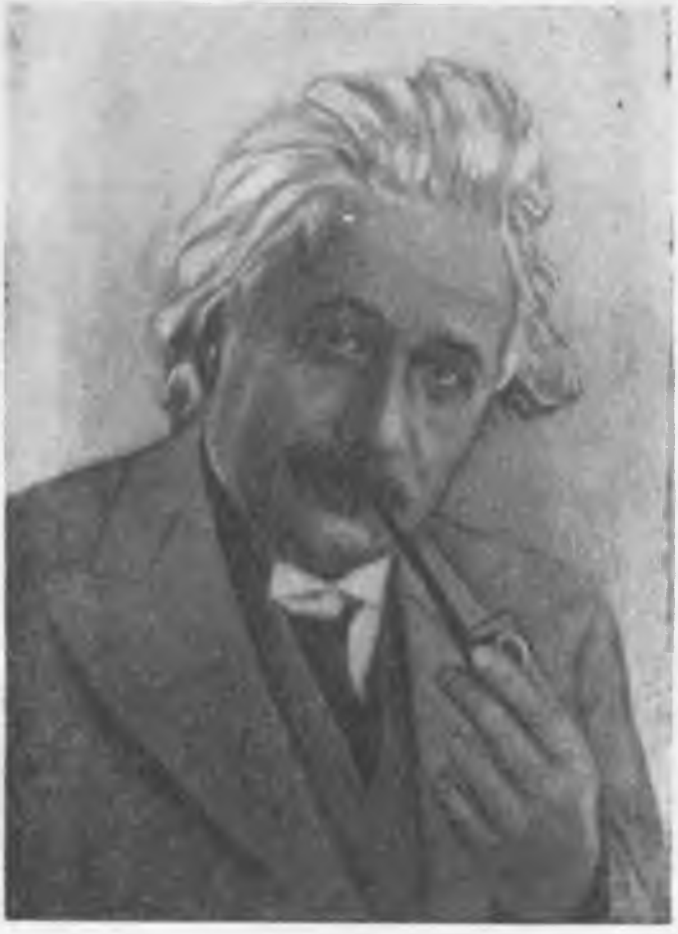
Эйнштейн создал теорию относительности — обобщающее физическое учение, которое выросло из классической электродинамики Лоренца и включило в себя всю ньютоновскую механику. Теория относительности Эйнштейна с единой точки зрения объяснила большой крут механических и электродинамических явлений и при этом вскрыла новый, более глубокий физический смысл таких фундаментальных понятий, как пространство, время, масса.

К большим научным заслугам Эйнштейна относится и развитие им основ теории квантов, что проложило путь в новую область физики — физику микрокосма.

Наконец, Эйнштейн (как и независимо от него польский физик Смолуховский) создал теорию броуновского движения и тем самым установил статистический характер закономерностей молекулярных движений. В дальнейшем им была разработана новая, квантовая статистика, применяемая к внутриатомным движениям частиц и движениям квантов света — фотонов.

В этих выдающихся достижениях проявилась основная черта творчества Эйнштейна — умение выбрать из огромной массы физических фактов, идей, проблем самые коренные, разрешение которых ведет к принципиальному повороту в науке, в восхождению ее на качественно новую ступень.

Альберт Эйнштейн родился 14 марта 1879 года в немецком городе Ульме (Вюртемберг). Окончив в 1900 году Цюрихский политехнический институт, он с 1902 по 1909 гг. работал в Патентном бюро в Берне. К этому периоду относится и начало научной деятельности Эйнштейна. Его первая работа, опубликованная в 1901 году, была посвящена теории капиллярных явлений. В двух следующих работах (1902—1903) он, ниче-



Альберт Эйнштейн

го не зная об аналогичных трудах Д. У. Гиббса (1901 г.), дал обоснование современной статистической физики и термодинамики. На эти работы Эйнштейн опирался впоследствии при построении теории броуновского движения. Всемирную известность принесли 26-летнему ученому его работы по квантовой теории света, теории броуновского движения и особенно — по специальной теории относительности, которые одна за другой были опубликованы в 1905 году в «Annalen der Physik».

В первой из них («Об одной эвристической точке зрения на возникновение и превращение света», март 1905 г.) Эйнштейн развил идею Планка (1900 г.) о квантовом характере процессов излучения и поглощения телом световой энергии. Эйнштейн пошел дальше Планка, дополнив его гипотезу смелым утверждением, что поток света или, иначе, распространяющееся в пространстве электромагнитное поле не только излучается и поглощается, но и распространяется, т. е. вообще существует в виде квантов света (фотонов). Гипотеза Эйнштейна сразу же дала замечательные плоды, позволив объяснить основные закономерности фотоэффекта (уравнение Эйнштейна для фотоэффекта).

В 1907 году Эйнштейн распространил гипотезу о квантовом характере энергии на тепловую энергию и на этой основе впервые получил возможность объяснить зависимость теплоемкости твердого тела от его температуры.

В дальнейшем (1917 г.), применяя методы статистики к модели атома, предложенной Бором в 1913 году, Эйнштейн занимался разработкой статистической квантовой теории испускания и поглощения света отдельным атомом. Эти теоретические исследования были завершены им в 1924 году, когда после появления работы индийского физика Бозе о применении методов статистической физики к фотонам была создана квантовая статистика Бозе—Эйнштейна.

Во второй статье 1905 года — «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» — Эйнштейн установил статистические законы движения таких частиц (иначе законы броуновского движения) и теоретически обосновал, что причиной хаотического движения достаточно малых взвешенных в жидкости частиц является хаотическое движение молекул самой жидкости. На основании своей теории Эйнштейн сделал важнейший вывод о возможности определить размеры отдельной молекулы. Теория броуновского движения Эйнштейна (как и аналогичная теория Смолуховского) была полностью подтверждена в экспериментальных работах французского физико-химика Ж. Перрена, шведского физико-химика Т. Сведберга и др.

Специальная теория относительности была изложена Эйнштейном в июльской статье 1905 года. Эта теория явилась плодом долгих размышлений над загадкой опыта Майкельсона (1881 г.). В этом опыте обнаружилась, как известно, полная независимость скорости распространения света от движения самой системы, в которой он распространяется (например, от движения Земли в пространстве). Опыт Майкельсона противоречил как ньютоновой классической механике с ее принципом относительности Галилея, так и лоренцовой электродинамике с ее гипотезой неподвижного

эфира. Выдвинутая и защищавшаяся Герцем гипотеза подвижного эфира, полностью увлекаемого движущимся в нем телом, хотя и не противоречила опыту Майкельсона, не могла, в свою очередь, объяснить опыта Физо, которым было показано, что если эфир существует, то увлекается лишь частично (т. е. движется с меньшей скоростью, чем увлекающее его тело).

Крупнейшие физики и математики, стремясь преодолеть эти трудности, подходили весьма близко к теории относительности. Всего за три недели до появления статьи Эйнштейна Анри Паункаре 5 июня 1905 года впервые ввел термин «постулаты относительности».

Однако все эти ученые не смогли сделать того, что сделал Эйнштейн—порвать с «привычными» представлениями о свойствах пространства и времени как свойствах абсолютных, не зависящих ни от каких физических явлений.

В основу теории относительности Эйнштейн положил два принципа. Один из них является обобщением принципа относительности Галилея и гласит: все физические явления как механические, так и электродинамические, происходят одинаково во всех телах, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Следовательно, никакими опытами, в том числе опытами над распространением света (Майкельсона), невозможно обнаружить равномерное и прямолинейное движение той системы (именно, Земли), в которой эти опыты производятся. Второй принцип заключается в утверждении постоянства скорости света в вакууме, независимо от движения наблюдателя или источника света.

Эйнштейн показал, что в свете этих принципов приобретают глубокий физический смысл так называемые преобразования координат и времени Лоренца. Последние были введены в 1904 году Г. А. Лоренцом чисто формально, для устранения противоречия с опытом Майкельсона при описании движений электронов со скоростями, близкими к скорости света. Эти преобразования, как показал Эйнштейн, отражают тот фундаментальный факт, что при движении любых тел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, масштабы тел, течение времени на них, само понятие «одновременность» событий оказываются не абсолютными, а относительными, зависящими от движения тела.

В этой же статье и затем окончательно в сентябре 1905 года Эйнштейн сделал еще один обобщающий вывод из теории относительности: масса любого тела пропорциональна содержащейся в нем полной энергии и изменяется, как его энергия, деленная на квадрат скорости света в вакууме[1] ($E=mc^2$).

Работы 1905 года сразу же выдвинули Эйнштейна в число физиков мирового значения. Он получил профессуру в Цюрихском (с 1909 г.), за-

[1] Впервые к подобному выводу, но для частного случая электромагнитной энергии движущегося заряженного тела, пришел английский физик Д. Д. Томсон (1881 г.). Эту же мысль высказывал Г. А. Лоренц (1900 г.).

Выводы Эйнштейна были неверно истолкованы некоторыми физиками как возможность перехода массы, материи в энергию, т. е. в нечто нематериальное. На самом же деле при уменьшении массы тела материя в форме вещества (или часть ее) переходит в другую форму материи — в излучение, энергия которого пропорциональна изменению массы тела.

тем в Пражском (1911—1912) и, наконец, в Берлинском (1914—1933) университетах. В Берлине Эйнштейн, кроме того, занимал пост директора Физического института. В 1913 г. он был избран членом Прусской и Баварской академий наук.

В 1916 году Эйнштейн завершил создание общей теории относительности (обобщенной теории тяготения), включившей в себя специальную теорию относительности как частный случай. В этой теории он вскрыл глубокую связь между тяготением и геометрическими свойствами реального пространства и времени. Согласно его теории свойства пространства и времени определяются распределением и движением в пространстве материи. Так, при наличии в пространстве тяготеющих масс, а следовательно, и поля тяготения, пространство должно иметь неэвклидовый характер, в согласии с положениями обобщенной, так называемой неэвклидовой геометрии (обычная, эвклидова геометрия представляет ее частный случай).

Основными уравнениями общей теории относительности являются выведенные Эйнштейном так называемые «мировые уравнения». Попытка Эйнштейна однозначно определить из решения этих уравнений геометрические свойства окружающей нас Вселенной и сделать вывод о пространственной конечности мира была подвергнута критике советским физиком и математиком А. А. Фридманом, показавшим ошибочность выводов Эйнштейна. Эйнштейн согласился с критикой А. А. Фридмана (см. очерк об А. А. Фридмане).

Следует отметить, что идеи теории относительности Эйнштейна были поняты и признаны далеко не сразу. Наиболее полное подтверждение специальная теория относительности получила в современной ядерной физике и ядерной технике, где при расчетах огромных ускорителей элементарных частиц уравнения специальной теории относительности оказались такими же необходимыми, как например, уравнения сопротивления материалов.

Основные выводы из общей теории относительности были блестяще подтверждены путем астрономических наблюдений.

Так, на основе общей теории относительности Эйнштейн впервые смог объяснить давно наблюдаемое загадочное движение перигелия Меркурия. Кроме того, он предсказал два других физических явления — отклонение от прямого пути луча света и замедление световых колебаний в поле тяжести. Эти явления становятся заметными лишь в колоссальных полях тяготения Солнца и других звезд.

Во время экспедиции для наблюдения солнечного затмения 29 мая 1919 года английскими астрономами были действительно обнаружены оба предсказанные Эйнштейном эффекта, что явилось настоящим триумфом теории относительности.

За свои выдающиеся научные заслуги Эйнштейн был избран членом многих иностранных академий, в том числе (в 1927 г.) почетным членом Академии наук СССР.

Еще в 1921 году он был удостоен высшей международной награды — Нобелевской премии по физике за работы о световых квантах.

С приходом к власти в Германии фашистов (1933 г.), Эйнштейн в знак протеста против начавшегося разгула антисемитизма и преследований прогрессивно настроенных ученых и студентов вышел из состава немецких академий. По приглашению организованного в г. Принстоне Института физики он эмигрировал в США, где оставался до конца своей жизни.

Последние десятилетия своей жизни Эйнштейн посвятил поискам единой теории, которая объединила бы теорию тяготения и теорию электромагнитного поля. Однако, несмотря на изумительное остроумие его методов и колосальное упорство, ему не удалось этого сделать.

Философские взгляды Эйнштейна отличались большой сложностью. Занимая в основном материалистическую позицию, он, особенно в последние годы, высказывал мысли о принципиальной непознаваемости некоторых свойств окружающего нас мира, т. е. выступал с позиций агностицизма.

Эйнштейн был не только великим ученым, но и большим гуманистом; он выступал против использования достижений науки в военных целях, против войны, за мирное сотрудничество наций.

Умер Эйнштейн 18 апреля 1955 года.

ТРУДЫ А. ЭЙНШТЕЙНА

Эйнштейн А. и **Инфельд Л.** Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квант. Пер. с англ. со вступит. статьей С. Г. Суворова. М.—Л., Гостехиздат, 1948. 267 стр., черт.

Эйнштейн А. Сущность теории относительности. Пер. с англ. Я. А. Смородинского, А. И. Базя, Л. Д. Пузикова. М., Изд. иностр. лит., 1955. 160 стр. с портр.

Перевод с четвертого издания (1953 г.), значительно расширенного и заново просмотренного автором. Русский перевод первого издания вышел в 1923 году под названием «Основы теории относительности».

Принцип относительности. Г. А. Лоренц — А. Пуанкаре.— А. Эйнштейн.— Г. Минковский. Сборник работ классиков релятивизма. Под ред. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко. Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1935. 388 стр. (Классики естествознания).

Работы А. Эйнштейна в этом сборнике: К электродинамике движущихся тел (стр. 133—174). Написано в 1905 году.— Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии? (стр. 175—178). Написано в 1905 году.— О влиянии силы тяжести на распространение света (стр. 217—230). Написано в 1911 году.— Основы общей теории относительности (стр. 231—305). Опубликовано впервые в 1916 году.— Принцип Гамильтона и общая теория относительности (стр. 306—314). Опубликовано впервые в 1916 году.— Вопросы космологии и общая теория относительности (стр. 315—331). Опубликовано впервые в 1917 году.— Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных материальных частиц? (стр. 332—342). Опубликовано впервые в 1919 году.

Броуновское движение. А. Эйнштейн.— М. Смолуховский. Сборник статей. Пер. К. И. Федченко. Под ред. Б. И. Давыдова. С доп. статьями Ю. А. Круткова и Б. И. Давыдова. Л., ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит., 1936. 607 стр.

Работы А. Эйнштейна: О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц,

требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты (стр. 13—27). Опубликовано впервые в 1905 году.— К теории броуновского движения (стр. 28—42). Опубликовано впервые в 1906 году.—Новое определение размеров молекул (стр. 43—65). Опубликовано впервые в 1906 году.— Теоретические замечания о броуновском движении (стр. 66—69). Написано в 1907 году.— Элементарная теория броуновского движения (стр. 70—84).

Эйнштейн А. Квантовая механика и действительность.— «Вопросы философии», 1957, № 3, стр. 126—128.

В статье опровергается мнение об отрицательном отношении Эйнштейна к квантовой механике. Автор говорит, что в действительности он отклонял не квантовую механику, а лишь интерпретацию ее копенгагенской, идеалистической школой физиков.

Эйнштейн А. О понятии пространства.— «Вопросы философии», 1957, № 3, стр. 123—126.

Эта статья написана в 1953 году в качестве предисловия к книге М. Джеммера «Понятия пространства. История теорий пространства в физике». Эйнштейн как бы подводит в ней итог своим многолетним творческим исканиям в области представлений о природе пространства. «...Не существует «пустого» пространства, то есть нет пространства без поля»,— вот основной вывод статьи.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. ЭЙНШТЕЙНА

Файнберг Е. Л. Эйнштейн Альберт (1879—1955).— БСЭ, 2-е изд., т. 48, 1957, стр. 341—344, портр.

Эйнштейн А. Творческая автобиография.— «Успехи физ. наук», 1956, т. 59, вып. 1, стр. 71—105.

То же в кн.: Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна. М., Гостехиздат, 1956, стр. 27—71.

Предполагается значительная подготовка читателя.

Кузнецов Б. Г. Альберт Эйнштейн.— «Техника—молодежи», 1955, № 9, стр. 5—7, портр.

Опыт популярного раскрытия сущности теории относительности.

Иоффе А. Ф. Памяти Альберта Эйнштейна.— «Успехи физ. наук», 1955, т. 57, вып. 2, стр. 187—192, портр.

Важнейшие научные открытия и методы Эйнштейна, их содержание и значение. Воспоминания автора о встречах с Эйнштейном.

Шпольский Э. В. Альберт Эйнштейн (1879—1955).— «Успехи физ. наук», 1955, т. 57, вып. 2, стр. 177—186, портр.

Краткий обзор работ Эйнштейна в области молекулярной физики, квантовой теории и теории относительности.

Иваненко Д. Д. и **Кузнецов Б. Г.** Памяти Альберта Эйнштейна.— .Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1955, т. 5, стр. 3—32.

Разделы статьи: Жизненный путь.— Специальная теория относительности.— Развитие общей теории относительности.— Работы Эйнштейна по статистической физике и квантовой теории.

Львов В. Жизнь Альберта Эйнштейна.— «Звезда», 1956, № 1, стр. 123—149; № 2, стр. 109—140.

Популярный очерк жизни и научного творчества Эйнштейна, написанный для широких кругов читателей.

Львов В. Жизнь Альберта Эйнштейна. М., «Молодая гвардия»,1958. 320 стр.; 5 л. илл. (Жизнь замечательных людей).

Повесть о жизни и творческом пути великого физика. В конце книги: Даты жизни Альберта Эйнштейна. — Библиография (труды Эйнштейна и литература о нем).

Инфельд Л. Мои воспоминания об Эйнштейне. (Пер. с польск. И. Е. Дудовской и Г. И. Залуцкого). — «Успехи физ. наук», 1956, т. 59, вып. 1, стр. 135—184.

То же в кн.: Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна. М., Гостехиздат, 1956, стр. 197—260.

Автор воспоминаний — крупный польский физик, многолетний сотрудник Эйнштейна, соучастник ряда работ, выпущенных им совместно с Эйнштейном

* *
*

Смородинский Я. А. Альберт Эйнштейн и его значение в развитии физики.— «Природа», 1956, № 6, стр. 23—32, портр.

Тамм И. Е. А. Эйнштейн и современная физика.— «Успехи физ. наук», 1956, т. 59, вып. 1, стр. 5—10.

То же в кн.: Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна. М., Гостехиздат, 1956, стр. 86—92.

Вступительное слово на заседании Отделения физико-математических наук 30 ноября 1955 года, посвященном 50-летию теории относительности.

Фок В. А. Замечания к творческой автобиографии Альберта Эйнштейна.— «Успехи физ. наук», 1956, т. 59, вып. 1, стр. 107—117.

То же в кн.: Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна. М., Гостехиздат, 1956, стр. 72—85.

Инфельд Л. История развития теории относительности.—«Успехи физ. наук», 1955, т. 57, вып. 2, стр. 193—203.

То же в кн.: Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна. М., Гостехиздат, 1956, стр. 183—196.

Доклад, прочитанный в Берлине 18 марта 1955 года в связи с 50-летием теории относительности.

Эйнштейн и современная физика. Сборник памяти А. Эйнштейна М., Гостехиздат, 1956. 260 стр.

Сборник составлен из статей, опубликованных в журнале «Успехи физических наук» (т. 57, вып. 2, 1955 г.; т. 59, вып. 1, 1956 г.). Помимо перечисленных, в сборнике напечатаны еще следующие работы: В. Л. Гинзбург. Экспериментальная проверка общей теории относительности (стр. 93—139); А. А. Михайлов. Наблюдения эффекта Эйнштейна во время солнечных затмений (стр. 140—159); В. А. Фок. Уравнения движения системы тяжелых масс с учетом их внутренней структуры и вращения (стр. 160—162); Макс Борн. Альберт Эйнштейн и световые кванты (стр. 163—182).

Аркадьев А. Г. Альберт Эйнштейн о капитализме и социализме.— «Вопросы философии», 1956, кн. 2, стр. 248—250.

В качестве основного источника использована статья Эйнштейна «Почему социализм?», впервые появившаяся в печати в 1949 году и затем вновь перепечатанная уже после его смерти в 1955 году.

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ФРИДМАН

(1888—1925)

Выдающийся математик, механик и физик Александр Александрович Фридман родился 17 июня 1888 года в Петербурге. Окончив в 1910 году физико-математический факультет Петербургского университета, он был оставлен при кафедре математики для подготовки к профессорскому званию. С этого времени начинается его педагогическая и научная деятельность. В течение ряда лет он читал курсы высшей математики, а затем механики в различных технических институтах Петрограда (1913—1914, 1920—1921 гг.), некоторое время (1918—1920 гг.), был профессором механики, а затем помощником ректора университета в г. Перми.

Организаторская деятельность А. А. Фридмана охватывала самые различные области науки и техники. Во время первой мировой войны А. А. Фридман, состоявший с 1913 года в штате Аэрологической обсерватории (в г. Павловске), служил в добровольческом авиационном отряде летчиком; был преподавателем в авиационной школе, организатором аэронавигационной службы в действующей армии, а с 1916 года — заведующим Центральной аэронавигационной и аэрологической службой фронта. В 1917 году Фридман принимал деятельное участие в строительстве и работе авиазавода в Москве — в качестве члена технической комиссии, а затем директора. В 1918 году в Перми по инициативе и под руководством А. А. Фридмана были созданы при университете технические отделения — химико-металлургическое, инженерно-строительное и электромеханическое. В 1923 году он был редактором «Журнала геофизики и метеорологии», а в последний год жизни занимал пост директора Главной геофизической обсерватории. Всего за два месяца до своей преждевременной смерти А. А. Фридман совершил рекордный по тому времени для СССР полет на аэростате, поднявшись на высоту 7 400 *м*.

Научная деятельность Фридмана была сосредоточена главным образом на теоретической метеорологии, гидромеханике и гидродинамике. В этих областях проявился, с одной стороны, его блестящий математиче-



Александр Александрович Фридман

ский талант, а с другой — неизменное стремление и умение доводить решение теоретических задач до конкретного, практического их приложения.

Фридман является одним из основоположников динамической метеорологии. Ему принадлежат фундаментальные работы по теории атмосферных вихрей, вертикальных воздушных течений и др. Он занимался также вопросами приложения теории физических процессов в атмосфере к воздухоплаванию.

Основным трудом А. А. Фридмана по гидромеханике и гидродинамике является его работа «Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости» (1922 г.). В ней он дал наиболее полную теорию вихревого движения в жидкости, рассмотрел, а для ряда случаев решил важную проблему о возможных движениях сжимаемой жидкости при действии на нее определенных сил. Работы А. А. Фридмана по гидродинамике и гидромеханике были тесно связаны с его исследованиями атмосферы (создание гидродинамической модели циклона и др.).

Большой вклад внес А. А. Фридман в общую теорию относительности — в решение так называемой космологической проблемы в ней. Основными уравнениями в общей теории относительности являются «мировые уравнения» Эйнштейна, характеризующие геометрические свойства четырехмерного пространства — времени. Из решения этих уравнений Эйнштейн сделал вывод, что окружающий нас мир имеет форму цилиндра и что при некоторых дополнительных условиях Вселенная пространственно конечна.

А. А. Фридман впервые показал, что решение «мировых уравнений» Эйнштейна ни при каких условиях не может быть однозначным и что при помощи этих уравнений нельзя дать определенного ответа на вопрос о «форме» Вселенной, о ее конечности или бесконечности. Он впервые нашел так называемые нестационарные решения «мировых уравнений», т. е. решение их при условии, что радиус кривизны пространства изменяется со временем [1]. В качестве примеров таких нестационарных решений А. А. Фридман построил три возможных модели Вселенной. В двух из них радиус кривизны монотонно увеличивается (Вселенная расширяется — в одном случае из точки, в другом — имеет в начальный момент некоторые конечные размеры). Третья модель — модель пульсирующей Вселенной, радиус кривизны которой изменяется с некоторым периодом.

Одна из этих теоретических моделей оказалась поразительно соответствующей тем выводам, которые можно было сделать на основании явления «красного смещения» в спектрах далеких галактик (открыто в 1916 г. Слайфером). Позднее другой американский астроном Хаббл обнаружил, что линии в спектрах далеких галактик смещены к красной области спектра тем бо́льше, чем дальше от нас находится галактика. Этот факт может быть истолкован как эффект Допплера, т. е. как эффект «разбегания» галактик во все стороны от нас. В настоящее время

---

[1] Согласно общей теории относительности пространство, окружающее нас, искривлено. Эйнштейн при решении «мировых уравнений» полагал радиус кривизны пространства постоянным.

большинство ученых действительно склоняется к объяснению «красного смещения» эффектом Допплера. Это совпадение теории и наблюдений чрезвычайно интересно, хотя значение его еще не вполне выяснено. Однако из него вовсе не следует, что вся Вселенная в целом расширяется и что она возникла некогда из одной точки (атома), как это утверждает бельгийский математик Леметр и некоторые зарубежные астрономы. Закономерность (разбегание галактик), наблюдаемую в одной части Вселенной, нет никаких оснований распространять на всю Вселенную.

Исследования А. А. Фридмана по общей теории относительности изложены в двух его статьях на немецком языке: «О кривизне пространства мира», напечатанной впервые в 1922 году в немецком журнале «Zeitschrift für Physik», и «О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства» (там же, 1924 г.).

В области теории относительности А. А. Фридману принадлежит также во многих отношениях очень интересная популярная работа «Мир как пространство и время» (Пг., 1923 г.). Ранняя смерть помешала ему закончить большой труд, подготовлявшийся им к печати совместно с В. К. Фредериксом,— «Основы теории относительности». После смерти А. А. Фридмана остался и ряд других незаконченных работ.

Характеристику этого замечательного ученого лучше всего закончить следующими словами:

«Уменье всматриваться в глубину, охватить широким размахом, ясно, кратко изложить, применить к практике или оставить в виде новой теории, осветить со всех сторон и дать новый толчок мысли,— таковы были характерные особенности его работы, а его творческая мысль проникала во все закоулки накопленных им знаний и освещала их ярким светом его дисциплинированного ума и творческой фантазии» [1].

Умер А. А. Фридман от брюшного тифа 16 сентября 1925 года в возрасте 37 лет.

В 1931 году А. А. Фридман за труды в области математики был посмертно удостоен премии имени В. И. Ленина.

ТРУДЫ А. А. ФРИДМАНА

Фридман А. А. Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости. Под ред., с примеч. Н. Е. Кочина, с доп. статьей Б. И. Извекова, И. А. Кибеля и Н. Е. Кочина. Л.—М., Гостехтеоретиздат, 1934. 370 стр.; 1 л. портр.

Фридман А. А. Мир как пространство и время. Пг., «Academia», 1923. 131 стр. (Современная культура).

Научно-популярная работа по теории относительности. Главы книги: 1. Пространство. 2. Время и мир. 3. Тяготение и материя.

Фредерикс В. К. и **Фридман А. А.** Основы теории относительности. Вып. 1. Тензориальное исчисление. Л., «Academia», 1924. 167 стр.

---

[1] Фридман Е. Е. «Памяти А. А. Фридмана». — «Геофизический сборник». Т. 5, вып. 1. Л., 1927, стр. 10.

Фридман А. А. На высоте 7 400 метров.— «Климат и погода», 1925, № 2—3, стр. 8—11.

Рассказ автора о совершенном им с научной целью полете на аэростате в 1925 году.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ А. А. ФРИДМАНА

Фридман Александр Александрович. (1888—1925).— БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 594.

А. А. Фридман. (Некролог).— «Журн. геофизики и метрологии», 1925, т. 2, вып. 3—4, стр. 133—136, портр.

Вангенгейм А. Ф. А. А. Фридман. (Некролог).— «Климат и погода», 1925. № 2—3. стр. 5—7 с портр.

Гюнтер Н. М. Памяти А. А. Фридмана... — «Журн. Ленингр. физ.-математ. о-ва», 1926, т. 1, № 1, стр. 5—11, портр.

Речь, произнесенная председателем Ленинградского физико-математического общества на заседании 26 сентября 1925 года. В конце некролога (стр. 9—11) — список научных трудов А. А. Фридмана (46 назв.).

В связи со смертью А. А. Фридмана в № 2—3 журнала «Климат и погода» за 1925 год в отделе хроники, были напечатаны следующие материалы: Похороны директора Главной геофизической обсерватории А. А. Фридмана (стр. 76).— Заграничные ученые о смерти А. А. Фридмана (стр. 76—77).— Памяти А. А. Фридмана (стр. 77—78).

Стеклов В. А. Некролог А. А. Фридмана.— В кн.: Геофизический сборник. Т. 5, вып. 1. Л., 1927, стр. 7—8.

Фридман Е. Памяти А. А. Фридмана.— Curriculum vitae А. А. Фридмана. Основные даты жизни и деятельности ученого.— Научные труды А. А. Фридмана (перечень).— В кн.: Геофизический сборник. Т. 5, вып. 1. Л., 1927, стр. 9—15.

Памяти профессора, летчика-наблюдателя А. А. Фридмана.— «Вестник возд. флота», 1925, № 10, стр. 36—37, портр.

Гаврилов А. Ф. Памяти А. А. Фридмана.— «Успехи физ. наук», 1926, т. 6, вып. 1, стр. 73—75.

Лойцянский Л. Г. и Лурье А. И. Александр Александрович Фридман.— «Труды Ленингр. политехн. ин-та», 1949, № 1, стр. 83—86, портр.

Краткий обзор научной, педагогической и практической деятельности ученого.

Мещерский И. В. Труды А. А. Фридмана по гидромеханике. Доклад в заседании Отделения физики Русского физико-химического общества и физико-математического общества 10 ноября 1925 г.— В кн.: Геофизический сборник. Т. 5, вып. 1. Л., 1927, стр. 57—60.

Извеков Б. И. Работы А. А. Фридмана в области геофизики.— «Журн. геофизики и метеорологии», 1926, т. 3, вып. 1—2, стр. 5—18.

Лорис-Меликов М. А. Работы А. А. Фридмана по теории относительности.— В кн.: Геофизический сборник. Т. 5, вып. 1. Л., 1927, стр. 61—63.

ГРИГОРИЙ САМУИЛОВИЧ ЛАНДСБЕРГ

(1890—1957)

Выдающийся советский физик, талантливый педагог и организатор науки в нашей стране Григорий Самуилович Ландсберг родился 22 января 1890 года в Вологде. Отец его, служащий лесной охраны, вскоре переехал с семьей в Нижний Новгород, где Г. С. Ландсберг закончил с золотой медалью гимназию. Восемнадцатилетним юношей он поступил на физико-математический факультет Московского университета и спустя пять лет с дипломом первой степени был оставлен при нем для подготовки к профессорскому званию. Однако разразившаяся первая мировая война и дальнейшие события надолго оторвали молодого ученого от Московского университета, в который он смог вернуться лишь в 1923 году. За этот период наиболее значительными для него были годы работы в Институте физики и биофизики (1920—1923), которым тогда руководил известный русский биофизик П. П. Лазарев и где работали в то время многие впоследствии крупные советские физики. Здесь определилось основное направление всей будущей научной деятельности Г. С. Ландсберга в области оптики, проблемам которой в Институте уделялось особое внимание.

После 1923 года деятельность Ландсберга была связана главным образом с Московским государственным университетом (1923—1941, 1945—1951), а также с Физическим институтом Академии наук СССР (с 1934 г.). В Университете он читал многочисленные общие и специальные курсы физики, руководил оптической лабораторией Физического института МГУ (1925—1941), а также кафедрой общей физики и физическим кабинетом (1932—1935). В МГУ, в творческом содружестве с замечательным советским физиком Л. И. Мандельштамом Г. С. Ландсберг начал в 1925 году свои исследования в области физической оптики. С 1934 года оптические исследования Ландсберга были в основном сосредоточены в ФИАНе, где он руководил оптической лабораторией.

Основным предметом своих исследований Ландсберг избрал один из наиболее сложных вопросов физической оптики — молекулярное, или рэ-

леевское рассеяние света в кристаллах. Молекулярным рассеянием света в настоящее время называют рассеяние света в однородной среде вследствие ее молекулярного строения, именно за счет флюктуаций плотности, возникающих при хаотическом тепловом движении молекул. Законы этого явления впервые были изучены (в 80-е годы прошлого века) для газов английским физиком Рэлеем (1842—1919), который, в частности, объяснил на этом основании голубой цвет неба. Однако правильное истолкование явления молекулярного рассеяния впервые дал Л. И. Мандельштам. Для твердых тел это явление до работ Мандельштама и Ландсберга не было даже обнаружено, так как оно перекрывалось рассеянием из-за других причин, главным образом вследствие неоднородных включений вещества в кристалле.

Первая же работа Г. С. Ландсберга и Л. И. Мандельштама в этой области (1926 г.) увенчалась успехом — они сумели выделить молекулярное рассеяние света в кристалле кварца. В дальнейшем Ландсберг вместе со своими учениками детально исследовал это явление, в частности, открыл анизотропию молекулярного рассеяния света в кристалле. Он показал недостаточность существовавшей теории явления. Новая теория была по его инициативе создана М. А. Леонтовичем и разработана затем учениками Г. С. Ландсберга.

В 1931 году Ландсберг и Мандельштам открыли новое явление — явление селективного рассеяния света в одноатомных парах металла. Оно заключается в том, что интенсивность рассеянного света резко возрастает при приближении длины волны падающего света к длине волны резонансной линии атомов рассеивающего вещества.

Но особенно замечательные результаты были получены Мандельштамом и Ландсбергом при изучении спектрального состава молекулярно-рассеянного света.

Этим вопросом Ландсберг заинтересовался ещё в 1918 году, когда он изучал тонкую структуру линии рассеянного света, обусловленную так называемым эффектом Мандельштама — Бриллюэна (см. очерк о Мандельштаме). Продолжая исследование спектрального состава света, полученного в результате молекулярного рассеяния, Ландсберг и Мандельштам пришли осенью 1927 года к выдающемуся открытию. Они обнаружили, что в спектре света, рассеянного в кристалле кварца, около линии с длиной волны монохроматического падающего света появляются так называемые «спутники», т. е. расположенные по некоторому закону и близко от основной дополнительные спектральные линии. Такие изменения длины волны падающего света не могли быть объяснены воздействием на падающую волну света тепловых волн в кристалле (эффект Мандельштама — Бриллюэна), так как они были значительно бо́льшими, чем при указанном эффекте. Дальнейшие тщательные исследования с неопровержимостью показали, что таинственные линии-спутники в спектре молекулярно-рассеянного света не что иное, как линии сложного излучения молекул рассеивающего вещества. При падении на молекулу световой волны она совершает не только вынужденные колебания, за счет чего получается «основная» (той же длины волны, что и падающий свет) линия в спектре рассеянного света. В молекуле возбуждаются еще и собственные



Григорий Самуилович Ландсберг

инфракрасные, или тепловые (низкочастотные) колебания, частота которых целиком определяется только свойствами данного вида молекулы. В результате наложения, комбинации этих колебаний (вынужденных и собственных) и возникают спутники в спектре рассеянного света. По предложению Г. С. Ландсберга новое явление было названо комбинационным рассеянием света. Оно открывало перед физиками и химиками самые широкие перспективы изучения рассеивающего вещества, так как разность между частотой падающего света и так называемыми комбинационными частотами (частотами спутников) зависит только от свойств молекул данного вещества. Понимая всю важность сделанного открытия, Мандельштам и Ландсберг лишь после многочисленных контрольных опытов и после проведения М. А. Леонтовичем расчетов, подтвердивших их первоначальные выводы, сочли возможным опубликовать свое открытие. Оно было опубликовано 6 мая 1928 года. За несколько недель до этого по телеграфу было получено сообщение индийского физика. В. Рамана об открытии им аналогичного явления в жидкостях.

Новое явление привлекло самое пристальное внимание большого числа исследователей. Ежегодно публиковались сотни работ по комбинационному рассеянию света (в настоящее время их насчитывается около пяти тысяч). Была разработана классическая и квантовая теория явления (И. Е. Тамм, М. А. Леонтович и др.) и выяснено огромное значение его для решения многих проблем молекулярной физики, физической и органической химии. Г. С. Ландсбергу принадлежит первостепенная роль в разработке и применении в этих областях науки новых, основанных на использовании комбинационного рассеяния света методов исследования. Чрезвычайно ценными являются работы Ландсберга и его учеников по применению спектров комбинационного рассеяния для изучения междумолекулярных взаимодействий, различных молекулярных процессов в растворах и чистых жидкостях, для исследования веществ в различных агрегатных состояниях, а также процессов перехода из одного агрегатного состояния в другое. По спектрам комбинационного рассеяния оказалось возможным изучать и структурные особенности самих молекул. В области органической химии в содружестве с представителями советской школы химиков-органиков, возглавлявшейся Н. Д. Зелинским и Б. А. Казанским, Г. С. Ландсберг разработал в 30-е годы эффективные методы молекулярного анализа смесей углеводородов. Эти методы нашли широкое применение в годы Отечественной войны для анализа моторного топлива (бензинов) и в настоящее время широко используются для исследования нефтей различных месторождений. Исследования в этой области Ландсберг продолжал и в послевоенные годы. В 1956 году вышла его монография «Основные параметры спектров комбинационного рассеяния углеводородов», в которой он подытожил результаты своих 20-летних исследований. В последние годы жизни Г. С. Ландсберг поставил новые важные проблемы в области молекулярного рассеяния — изучение рассеяния в вязких жидкостях и аморфных телах.

Характерной чертой творчества Г. С. Ландсберга было стремление объединить науку с практикой. Это особенно ярко проявилось в его исследованиях (с 1931 г.) по практическому применению спектрального

анализа. Работы в этой области, как и его исследования по комбинационному рассеянию, представляют одну из основных заслуг Г. С. Ландсберга не только как ученого, но прежде всего как организатора применения научных методов в производстве. Благодаря неутомимой научной и организационной деятельности Ландсберга спектральный анализ у нас в стране вышел из стен научных лабораторий на широкое поле промышленной практики и стал успешно применяться на металлургических, машиностроительных, авиационных заводах. Ландсбергу принадлежит разработка конструкций приборов для быстрого, высокоэффективного полуколичественного спектрального анализа чугуна, сталей и т. д. Огромную роль в деле разработки и внедрения в промышленность спектроскопических методов контроля сыграла организованная Г. С. Ландсбергом в 1937 году Комиссия по спектроскопии Академии наук СССР.

За работы в области спектрального анализа ученому в 1941 году была присуждена Сталинская премия.

Наряду с научными исследованиями Г. С. Ландсберг вел обширную педагогическую деятельность и был незаурядным педагогом. Он воспитал многих видных советских физиков. Одновременно с работой в МГУ Г. С. Ландсберг был профессором физики (с 1923 г.) во II Московском университете (Государственный педагогический институт им. В. И. Ленина), где до 1931 года заведовал физико-техническим отделением. При его непосредственном участии был создан в 1951 году Московский физико-технический институт. Г. С. Ландсбергу принадлежит ряд замечательных курсов по различным отделам физики. Среди них — его широко известный курс «Оптика», недавно вышедший четвертым (переработанным) изданием, «Элементарный учебник физики» и др.

Много сил Г. С. Ландсберг отдавал научно-организационной работе. Он руководил физической секцией Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний, был одним из организаторов издания и членом редколлегии ряда научных журналов, руководил Всесоюзной конференцией спектроскопистов и т. д.

За выдающиеся заслуги перед советской наукой Г. С. Ландсберг еще в 1932 году был избран в члены-корреспонденты, а в 1946 году — в действительные члены Академии наук СССР. Плодотворная деятельность ученого продолжалась до последних дней его жизни. Г. С. Ландсберг скончался скоропостижно, в расцвете творческих сил, 2 февраля 1957 года.

ТРУДЫ Г. С. ЛАНДСБЕРГА

Ландсберг Г. С. и **Мандельштам Л. И.** Новое явление при рассеянии света.— «Журн. Русского физ.-хим. о-ва, ч. физ.», 1928, т. 60, вып. 4, стр. 335—338.

Ландсберг Г. С. Новое в вопросе о рассеянии света.— «Успехи физ. наук», 1929, т. 9, вып. 1, стр. 35—78.

Ландсберг Г. С. Комбинационное рассеяние света и его значение для химических проблем.— «Успехи химии», 1932, т. 1, вып. 4, стр. 464—500, илл.

Ландсберг Г. С. Междумолекулярные силы и комбинационное рассеяние света.— «Известия Акад. наук СССР. Отд-ние матем. и естеств. наук, серия физ.», 1938, № 3, стр. 373—382.

Ландсберг Г. С. и **Барышанская Ф. С.** Влияние температуры на спектр рассеяния кристаллов, содержащих ОН-группы.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 147—156.

Ландсберг Г. С. Методы молекулярного спектрального анализа органических смесей.— В кн.: Труды Всесоюз. совещания по химии и переработке нефти (18—24 сентября 1951 г.). Баку, Акад. наук Азерб. ССР, 1953, стр. 7—20, илл.

Ландсберг Г. С., Бажулин П. А. и **Сущинский М. М.** Основные параметры спектров комбинационного рассеяния углеводородов. М., Акад. наук СССР, 1956. 342 стр. с илл. (Акад. наук СССР. Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева).

Ландсберг Г. С. Оптика. Изд. 4-е, переработ. М., Гостехиздат, 1957. 760 стр. с илл. (Общий курс физики. Т. 3).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Г. С. ЛАНДСБЕРГА

Ландсберг Григорий Самуилович. — БСЭ, 2-е изд., т. 24, 1953, стр. 275, портр.

Тумерман Л. А. и **Фабелинский И. Л.** Академик Григорий Самуилович Ландсберг.— «Физика в школе», 1957, № 3, стр. 22—24, портр.

Популярный очерк научной, педагогической и организаторской деятельности.

Мандельштам С. Л. Краткий очерк жизни и деятельности академика Г. С. Ландсберга.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 289—299.

Хайкин С. Член-корреспондент Академии наук СССР Г. С. Ландсберг.— В кн.: Лауреаты Сталинской премии — ученые МГУ. М., МГУ, 1941, стр. 44—46.

К присуждению Г. С. Ландсбергу в 1941 году Сталинской премии за разработку метода спектрального анализа для определения состава сплавов и спецсталей.

Фабрикант В. А. Г. С. Ландсберг как автор и редактор учебников по физике.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 64, вып. 2, стр. 455—460.

* *
*

60-летие со дня рождения академика Г. С. Ландсберга было отмечено статьями:

Чествование академика Г. С. Ландсберга.— «Вестник Акад. наук СССР», 1950, № 4, стр. 91—93.

Краткое изложение доклада С. Л. Мандельштама на заседании Ученого совета Физического института имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР, посвященном 60-летию со дня рождения Г. С. Ландсберга.

Академик Г. С. Ландсберг. (К шестидесятилетию со дня рождения.). — «Журн. эксперим. и теорет. физики», 1950, т. 20, вып. 4, стр. 289—291, портр.

К шестидесятилетию со дня рождения академика Г. С. Ландсберга.— «Успехи физ. наук», 1950, т. 41, вып. 1, стр. 128—130.

Григорий Самуилович Ландсберг. К 60-летию со дня рождения.— «Заводская лаборатория», 1950, № 4, стр. 511—512, портр.

* *
*

Тамм И. Е. Памяти Г. С. Ландсберга.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 287—288.

Вступительное слово на Объединенном заседании Отделения физико-математических наук Академии наук СССР, Физического института имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР, Комиссии по спектроскопии при Отделении физико-математических наук Академии наук СССР и Московского физико-технического института, посвященном памяти академика Г. С. Ландсберга.

Григорий Самуилович Ландсберг.— «Журн. эксперим. и теорет. физики», 1957, т. 32, вып. 3, стр. 409—412, портр.

Григорий Самуилович Ландсберг.— «Оптика и спектроскопия», 1957, т. 2, вып. 3, стр. 285—289.

Григорий Самуилович Ландсберг.— «Заводская лаборатория», 1957, № 3, стр. 383—384, портр.

* *
*

Статьи, в которых раскрывается содержание научных открытий Г. С. Ландсберга:

Сущинский М. М. и **Бажулин П. А.** Применение комбинационного рассеяния света к исследованию состава и строения вещества.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 301—321.

Фабелинский И. Л. Некоторые вопросы молекулярного рассеяния света в жидкостях.—«Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 355—410.

Малышев В. И. Исследование водородной связи спектроскопическими методами.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 323—353.

Корицкий В. Г., Налимов В. В., Недлер В. В. [и др.]. Краткий очерк развития эмиссионного спектрального анализа в СССР.— «Успехи физ. наук», 1957, т. 63, вып. 2, стр. 435—454.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Григорий Самуилович Ландсберг. Вступит. статья С. Л. Мандельштама и И. Л. Фабелинского. Библиогр. сост. Т. О. Вреден-Кобецкой. М., 1953. 58 стр.; 1 л. портр. (Акад. наук СССР. Материалы к биобиблиографии ученых СССР. Серия физики, вып. 6).

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ВАВИЛОВ

(1891—1951)

С. И. Вавилов родился 24 марта 1891 года в Москве в купеческой семье. В 1914 году он окончил с отличием Московский университет, где изучал физику под руководством П. Н. Лебедева.

Первые научные исследования Вавилова относились к вопросу о выцветании красителей под действием тепла. За работу на эту тему он в 1915 году получил золотую медаль Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете.

В годы первой мировой войны Вавилов, будучи на фронте, провел важные исследования в области радиофизики и, в частности, предложил новый метод радиопеленгации — определения направления на излучатель радиоволн.

Основные научные заслуги С. И. Вавилова связаны с его трудами по физической оптике. Среди них важное место занимают его многолетние, начатые в 1920—1921 гг. исследования люминесценции — явления нетемпературного свечения различных веществ, вызываемого физическими, химическими и биологическими факторами. Работы Вавилова в этой области посвящены главным образом фотолюминесценции растворов.

Вавилов дополнил и обобщил выведенное в 1852 году английским физиком Д. Г. Стоксом правило для взаимного расположения спектров поглощенного (возбуждающего) света и света фотолюминесценции. Согласно правилу Стокса, длина волны света люминесценции всегда больше длины волны поглощенного света, возбудившего эту фотолюминесценцию. Позже было открыто явление так называемой антистоксовской люминесценции, при которой соотношение длин волн оказалось обратным. Вавилов объяснил механизм явления как в том, так и в другом случае и в 1945 году сформулировал общий закон фотолюминесценции: при переходе от коротких волн возбуждающего света к более длинным волнам выход люминесценции вначале растет пропорционально длине волны, за-



Сергей Иванович Вавилов

тем, начиная с определенной длины волны возбуждающего света, некоторое время остается постоянным, а в дальнейшем быстро уменьшается. Эти исследования привели С. И. Вавилова к созданию так называемой теории миграции энергии излучения в растворах. Вавилов впервые разработал и общую систематику многочисленных и разнообразных видов люминесценции.

Практическим следствием работ Вавилова в области люминесценции, явилось создание им, совместно с сотрудниками, различных новых типов люминесцентных ламп, или ламп холодного свечения. Помимо других преимуществ (благоприятный для зрения спектральный состав и т. п.), такие лампы по сравнению с лампами накаливания обладают в 3—4 раза большей светоотдачей и в 3 раза более длительным сроком службы.

Первостепенное значение для науки и техники имеют разработанные С. И. Вавиловым методы люминесцентного анализа — химического (качественного и количественного) и сортового. Люминесцентный химический анализ позволяет обнаружить малейшие примеси вещества, способного к люминесценции, и в настоящее время находит широкое применение в химии, минералогии, медицине, в химической и пищевой промышленности. С помощью сортового люминесцентного анализа различают одинаковые на вид тела, предварительно возбуждая в них люминесценцию.

Большим вкладом в науку явились исследования С. И. Вавиловым характера излучения и поглощения элементарными излучателями света — молекулами и атомами — путем визуального наблюдения предельно слабых потоков света. Использовав высокую чувствительность человеческого глаза, Вавилов и его сотрудники впервые непосредственно наблюдали квантовые флюктуации света — прерывистость процессов излучения и поглощения. Эти опыты подтвердили, что свет наряду с волновыми обладает и корпускулярными свойствами. С. И. Вавилов изучал также взаимодействия между излучающими и поглощающими молекулами при чрезвычайно малых расстояниях между ними (сравнимых с длиной световой волны). Этими исследованиями, подытоженными Вавиловым в его последней книге «Микроструктура света» (1950 г.), были заложены основы нового, важного раздела физической оптики — микрооптики.

Выдающимся научным достижением Вавилова и его ученика П. А. Черенкова было открытие явления свечения электронов при движении их в жидкостях (любых растворах, воде, спирте) со скоростями, бо́льшими скорости света для данной среды. Новое явление получило название «эффекта Черенкова — Вавилова».

Еще в 1934 году П. А. Черенков, исследуя люминесценцию жидкостей при облучении их гамма-лучами, обратил внимание на слабое синее свечение прозрачных жидкостей, которое происходило независимо от химического состава облучаемого вещества, т. е. не так, как при люминесценции. Такое свечение наблюдалось и раньше, но его считали обычной люминесценцией. С. И. Вавилов также заинтересовался этим явлением. Он предложил Черенкову проделать ряд опытов для выяснения природы свечения и на основании их результатов высказал вскоре правильную мысль, что источником излучения в данном случае являются быстрые

электроны, возникающие в веществе под действием гамма-лучей. Дальнейшие эксперименты Черенкова подтвердили это мнение.

В 1937 году советские физики И. Е. Тамм и И. М. Франк разработали теорию нового явления и показали его большое научное значение.

Существенно важную роль сыграл С. И. Вавилов в развитии отечественной оптической промышленности. Его научная и организаторская деятельность в этой области, особенно важная в годы Великой Отечественной войны, была отмечена высокими правительственными наградами.

Большое значение придавал С. И. Вавилов исследованиям в области истории науки. Лично ему принадлежит ряд работ по истории атомистики, по исследованию научного творчества Лукреция Кара, Галилея, Ньютона, Эйлера, Ломоносова, В. В. Петрова.

Научные заслуги С. И. Вавилова были отмечены избранием его сначала членом-корреспондентом (1931 г.), затем действительным членом (1932 г.) и, наконец, в 1945 году — Президентом Академии наук СССР. В 1946 и в 1950 гг. С. И. Вавилов избирался также Депутатом Верховного Совета СССР.

Наряду с большой исследовательской работой чрезвычайно обширной и многообразной была педагогическая, организаторская и популяризаторская деятельность С. И. Вавилова.

Чтение курсов физики в московских вузах — в университете (1918—1932), где с 1929 года он был профессором и заведующим кафедрой физики; в Высшем техническом училище (1918—1927); заведование отделом физической оптики в Институте физики и биофизики (1918—1930), где проводились и собственные научные исследования Вавилова; руководство Физическим институтом Академии наук СССР; работа в качестве научного руководителя в Государственном оптическом институте; наконец, огромная научно-организаторская работу на посту Президента Академии наук СССР (1945—1951) — вот то обширное поле деятельности, на котором Сергей Иванович Вавилов проявил себя не только талантливым научным руководителем, педагогом и организатором, но и крупным государственным деятелем. По его инициативе в системе Академии наук СССР был создан ряд новых и расширены существующие научно-исследовательские институты. Много энергии он отдал повышению уровня подготовки молодых научных кадров, немало усилий приложил для укрепления связи науки и производства.

Большую работу вел С. И. Вавилов по редактированию советских научных журналов в области физики, возглавляя с 1945 года Редакционно-издательский совет Академии наук СССР.

Особо должна быть отмечена большая популяризаторская деятельность Вавилова и как автора многих научно-популярных книг и как руководителя (с 1933 г.) Комиссии Академии наук СССР по изданию научно-популярной литературы. Вавилов был одним из организаторов и первым председателем Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний.

Умер С. И. Вавилов в расцвете творческих сил 25 января 1951 года в Москве. Имя его присвоено Институту физических проблем Академии наук СССР, а также Государственному оптическому институту в Ленин-

граде. В честь С. И. Вавилова учреждена золотая медаль, ежегодно присуждаемая за лучшие работы по физике.

ТРУДЫ С. И. ВАВИЛОВА

Вавилов С. И. Собрание сочинений. М., Акад. наук СССР, 1952—1956.

Сочинения С. И. Вавилова издаются по постановлению Правительства СССР. К концу 1956 г. вышли следующие тома:

Т. 1. Работы по физике. 1914—1936. 1954. 452 стр. с илл.; 20 л. илл. и портр.

Т. 2. Работы по физике. 1937—1951. 1952. 548 стр. с илл.; 3 л. портр.

Т. 3. Работы по философии и истории естествознания. 1956. 870 стр. с илл.; 3 л. портр.

Т. 4. Экспериментальные основания теории относительности. О «теплом» и «холодном» свете.— Глаз и солнце.— Научно-популярные и обзорные статьи. 1956. 470 стр. с илл.; 11 л. илл. и портр.

В пятый и последний том будут включены избранные публицистические статьи ученого, а также часть научно-популярных работ, не вошедших в предыдущий том.

Вавилов С. И. Микроструктура света. (Исследования и очерки). М., 1950. 198 стр., илл. (Акад. наук СССР. Серия «Итоги и проблемы современной науки»).

Последний итог работ С. И. Вавилова в области оптики. Труд вошел во 2-й том его собрания сочинений.

Вавилов С. И. Глаз и солнце. (О свете, солнце и зрении). Изд. 7-е М., Акад. наук СССР, 1956. 128 стр., илл. и портр. (Акад. наук СССР. Науч.-попул. серия).

Первое издание книги вышло в 1927 году. В 1952 году эта книга вместе с книгой «Микроструктура света» была удостоена Сталинской премии первой степени.

Вавилов С. И. О «теплом» и «холодном» свете. (Тепловое излучение и люминесценция). М., «Знание», 1956. 48 стр. (Всесоюз. о-во по распространению полит. и науч. знаний. Серия 3. № 9).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ С. И. ВАВИЛОВА

Общая литература

Топчиев А. В. Вавилов Сергей Иванович (1891—1951).— БСЭ, 2-е изд., т. 6, 1951, стр. 480—482, портр.

Топчиев А. В. Памяти президента Академии наук СССР академика С. И. Вавилова.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 5—16, портр.

Кравец Т. П. Сергей Иванович Вавилов — ученый и деятель.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1951, Т. 15, № 5, стр. 523—532.

Кравец Т. П. С. И. Вавилов. Очерк жизни и деятельности.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 18—33.

Идельсон Н. И. Памяти С. И. Вавилова.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 17, стр. 127—136.

Выступление на заседании Комиссии по истории физико-математических наук 20 марта 1957 года.

Кузнецов И. В. Пример беззаветного служения науке, социалистической Родине. (К годовщине со дня смерти академика С. И. Вавилова).— «Природа», 1952, № 1, стр. 72—84, портр.

Характеристика С. И. Вавилова как выдающегося физика, материалиста-диалектика, организатора науки.

Шпольский Э. В. Сергей Иванович Вавилов.— В кн.: Проблемы физической оптики и другие вопросы физики. Сборник статей, посвященный памяти С. И. Вавилова. М.—Л., Гостехиздат, 1951, стр. 5—19.

Левшин В. Л. Научная и педагогическая деятельность С. И. Вавилова.— «Вестник Моск. ун-та», 1953, № 5, стр. 3—15.

Доклад на объединенном заседании физического факультета МГУ и Физического института имени П. Н. Лебедева.

Теренин А. Н. Научная деятельность С. И. Вавилова.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 5—17.

Левшин В. Л. Сергей Иванович Вавилов. (Очерк жизни и деятельности).— В кн.: Вавилов С. И. Собрание сочинений. Т. 1. М., Акад. наук СССР, 1954, стр. 7—48, портр.

Биография ученого, обзор его научной деятельности и трудов.

Шпольский Э. В. Выдающийся советский ученый С. И. Вавилов. (1891—1951). М., «Знание», 1956. 40 стр., илл. (Всесоюз. о-во по распространению полит. и науч. знаний).

Биография и обзор научных работ.

Артоболевский И. И. Выдающийся советский ученый и общественный деятель Сергей Иванович Вавилов. М., «Правда», 1951. 48 стр. с портр. (Всесоюз. о-ва по распространению полит. и науч. знаний).

Биография, важнейшие научные труды, научно-организационная и общественная деятельность, пропаганда политических и научных знаний, популяризация науки.

Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., 1952. 376 стр. с илл.; 15 л. портр. (Акад. наук СССР).

Проблемы физической оптики и другие вопросы физики. Сборник статей, посвященных памяти С. И. Вавилова. Под ред. Э. В. Шпольского. М.—Л., Гостехиздат, 1951. 380 стр.

Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953. 360 стр. (Гос. ордена Ленина оптический ин-т им. С. И. Вавилова).

Труды Института истории естествознания и техники [Акад. наук СССР]. Т. 17. История физико-математических наук. М., 1957. 532 стр. с илл.; 1 л. портр.

Том посвящается памяти С. И. Вавилова.

Помимо статей В. Л. Левшина, В. Л. Ченакала, А. П. Юшкевича и др. (см. ниже),

в томе напечатаны: воспоминания о С. И. Вавилове академиков Г. С. Ландсберга, П. А. Ребиндера, А. А. Лебедева, А. Е. Арбузова, А. В. Винтера, И. П. Бардина; обзоры архивных материалов С. И. Вавилова и др.

Литература о работах С. И. Вавилова в области оптики

Лешковцев В. А. О работах С. И. Вавилова по физической оптике.— «Физика в школе», 1952, № 1, стр. 8—18, портр.

Теренин А. Н. и **Феофилов П. П.** Крупнейший советский ученый-оптик. К 60-летию со дня рождения С. И. Вавилова.— «Вестник Акад. наук СССР», 1951, № 3, стр. 111—121.

Теренин А. Н. Научная деятельность С. И. Вавилова в области оптики.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 29—44, портр.

Первые научные работы. Работы по фотолюминесценции. Работы в области интерференционных явлений. Явление Вавилова—Черенкова. Работы по квантовым флюктуациям света.

Феофилов П. П. Сергей Иванович Вавилов (24/III 1891—25/I 1951).— «Оптика и спектроскопия», 1956, № 1, вып. 2, стр. 107—112, портр.

Краткий обзор работ С. И. Вавилова в области оптики и истории оптики.

Пинегин Н. И. С. И. Вавилов и физиологическая оптика.— «Природа», 1951, № 8, стр. 10—15, портр.

Гершун А. А. и **Лазарев Д. Н.** Работы С. И. Вавилова в области фотометрии и светотехники.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 222—229.

Болдырев Н. Г. Значение работ С. И. Вавилова по квантовым флюктуациям света для теории процесса зрительного восприятия в светотехнике.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 266—276.

Левшин В. Л. Труды С. И. Вавилова в области оптики.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 17, стр. 7—43.

Литература о работах С. И. Вавилова в области люминесценции

Левшин В. Л. С. И. Вавилов — создатель и глава советской школы люминесценции.— «Известия Акад. наук СССР. Серия физ.», 1951, т. 15, № 5, стр. 513—522, портр.

Феофилов П. П. Работы С. И. Вавилова по поляризованной люминесценции и их развитие.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 41—52.

Константинова-Шлезингер М. А. Академик С. И. Вавилов и его роль в развитии люминесцентного анализа. (К 5-летию со дня смерти).— «Журн. аналит. химии», 1956, т. 11, вып. 1, стр. 115—119. портр.

Литература о работах С. И. Вавилова по философии и истории естествознания

Кузнецов И. В. С. И. Вавилов — ученый-патриот, воинствующий материалист-диалектик.— «Вопросы философии», 1951, № 1, стр. 62—82.

Кузнецов И. В. Работы С. И. Вавилова по философии и истории естествознания.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 45—77.

Карпов М. М. Труды С. И. Вавилова по философии естествознания.— «Природа», 1951, № 12, стр. 56—64.

Кузнецов Б. Г. С. И. Вавилов как историк науки.— «Известия Акад. наук СССР. Серия истории и философии», 1951, т. 8, № 1, стр. 11—21.

В несколько измененной редакции эта же статья напечатана в «Трудах Института истории естествознания Академии наук СССР», 1952, т. 4, стр. 5—17.

Ченакал В. Л. С. И. Вавилов — исследователь творчества М. В. Ломоносова.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 17, стр. 44—65.

Юшкевич А. П. С. И. Вавилов как исследователь творчества И. Ньютона.— «Труды Ин-та истории естествознания и техники» [Акад. наук СССР], 1957, т. 17, стр. 66—89.

С. И. Вавилов — организатор науки

Этой стороне деятельности посвящены следующие статьи в сборнике: **Памяти Сергея Ивановича Вавилова.** М., Акад. наук СССР, 1952.

Петровский И. Г. и Левшин В. Л. Деятельность С. И. Вавилова в Отделении физико-математических наук Академии наук СССР (стр. 17—28).

Мусхелишвили Н. И. С. И. Вавилов и развитие академий наук союзных республик (стр. 78—88).

Левшин В. Л. С. И. Вавилов — воспитатель кадров науки (стр. 89—97).

С. И. Вавилов — пропагандист и популяризатор науки

Артоболевский И. И. С. И. Вавилов — выдающийся пропагандист и популяризатор научных знаний.—В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 98—106, портр.

Севастьянова М. В. Сергей Иванович Вавилов как популяризатор науки.— В кн.: Труды сессии, посвященной памяти академика Сергея Ивановича Вавилова. М., Оборонгиз, 1953, стр. 34—40, портр.

Шпольский Э. В. Научно-популярные книги С. И. Вавилова.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 107—115.

Радовский М. И. С. И. Вавилов — организатор научно-популярных изданий.— «Успехи физ. наук», 1952, т. 47, вып. 3, стр. 477—481.

Деятельность С. И. Вавилова как председателя Комиссии по изданию научно-популярной литературы Академии наук СССР (1932—1951 гг.).

Зворыкин А. А. С. И. Вавилов — редактор Большой советской энциклопедии.— В кн.: Памяти Сергея Ивановича Вавилова. М., Акад. наук СССР, 1952, стр. 116—133.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАТЕЛИ

Сергей Иванович Вавилов. Вступит. статья В. Л. Левшина. Библиография сост. Т. О. Вреден-Кобецкой. М.—Л., 1949. 116 стр. (Акад. наук СССР. Материалы к биобиблиографии ученых СССР. Серия физики, вып. 3).

Хронологический список трудов С. И. Вавилова за 1913—1948 гг. Алфавитный перечень трудов. Литература о жизни и трудах С. И. Вавилова.

Этот же список, несколько дополненный, помещен в следующих изданиях:

Успехи физических наук, 1951, т. 44, вып. 1, стр. 136—169.

Проблемы физической оптики и другие вопросы физики. М.—Л., Гостехиздат, 1951, стр. 352—376.

ЯКОВ ИЛЬИЧ ФРЕНКЕЛЬ

(1894—1952)

Выдающийся советский физик Яков Ильич Френкель родился 10 февраля 1894 года в Ростове-на-Дону.

В 1913 году он поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, который закончил в 1916 году. Сдав магистерские экзамены, Я. И. Френкель был избран доцентом Крымского университета, где преподавал с перерывами с 1918 по 1921 гг. Затем по приглашению А. Ф. Иоффе он перешел на работу в Петроградский физико-технический институт. В течение целого ряда лет Я. И. Френкель был связан с Политехническим институтом, где руководил кафедрой теоретической физики на физико-механическом факультете. В 1929 году он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В 1945—1947 гг. работал также в Главной геофизической обсерватории в Ленинграде.

Научная деятельность Я. И. Френкеля была весьма разнообразна. Наибольшей его заслугой являются теоретические исследования по физике кристаллов, результатом которых было создание им молекулярной теории кристаллов. Этой проблемой Френкель заинтересовался под влиянием академика А. Ф. Иоффе.

Опираясь на термодинамические принципы, Я. И. Френкель в 1923 году разработал статистическую теорию ионной проводимости кристаллов. Согласно этой теории, упорядоченное расположение ионов и атомов в кристалле (так называемая кристаллическая решетка) не является чем-то неизменным, как это считалось прежде. Вследствие своего теплового движения ионы и атомы кристалла могут покидать узлы кристаллической решетки и переходить в пространство между узлами, за счет чего возникают искажения, дефекты кристаллической решетки (идею эту впервые высказал А. Ф. Иоффе). Теория ионной проводимости кристаллов (теория «дефектов по Френкелю») сыграла важную роль в физике полупроводников, которые в настоящее время приобретают такое большое значение в науке и технике.

К молекулярной теории кристаллов Я. И. Френкель неоднократно возвращался на протяжении всей своей жизни. В начале 30-х годов он создал количественную теорию вращательных движений молекул в кристаллах, что позволило объяснить открытое незадолго перед тем [1] явление комбинационного рассеяния. Большое число работ Я. И. Френкеля (совместно с Т. А. Конторовой) посвящено теоретическому исследованию механических свойств кристаллов (деформация, прочность) на основе движений атомов в кристалле.

С именем Я. И. Френкеля непосредственно связана и молекулярная теория жидкостей. Впервые в 1925 году им была высказана плодотворная мысль о сходстве молекулярной структуры жидкости со структурой твердого кристаллического тела (а не сжатого газа, как это предполагали прежде). Я. И. Френкель показал, что молекулы жидкостей, как и молекулы кристаллов, совершают колебательные движения возле некоторых положений равновесия, с тем только отличием, что в жидкости сами эти положения равновесия меняются. Свои многолетние исследования в области молекулярной теории жидкости он подытожил в монографии «Кинетическая теория жидкостей», вышедшей в 1945 году.

В своей молекулярной теории кристаллов и жидкостей Френкель широко использовал методы термодинамики и статистической физики.

Важные исследования принадлежат Я. И. Френкелю в области электронной теории металлов и диэлектриков. В 1924 году он впервые подробно исследовал движение свободных электронов в металлах, определил их механическую энергию и указал, что скорости этих электронов должны быть близки не к тепловым, как это считали до него, а к внутриатомным. На этом основании Френкель в 1927—1928 гг. объяснил сопротивление металлов электрическому току и сходство теплоемкости металлов и диэлектрических кристаллов. Вместе с А. Ф. Иоффе он в 1931 году развил теорию выпрямляющего действия контакта металла с полупроводником.

В 1924—1927 гг. Я. И. Френкель предложил первую квантовую теорию металлов, учитывающую квантовый характер движений свободных электронов в них. Эти представления, как выясняется теперь, оказываются более глубокими, чем представления электронной теории металлов Зоммерфельда, которая была создана на основе применения статистической физики к своеобразному «электронному газу» из свободных электронов.

К 1924 году относятся работы Я. И. Френкеля по теории абсорбции (конденсации газов и паров на твердых телах). В 1931 году он развил теорию поглощения света в диэлектриках.

Важное место среди научных работ Я. И. Френкеля занимают его исследования по физике атомного ядра, где ему принадлежат замечательные открытия. Он создал так называемую капельную модель ядра атома тяжелого элемента (например, урана). Использовав в области ядерной физики — тогда еще совсем новой науки — представления термодинамики и методы статистической физики, он в 1936 году (одновременно с Н. Бо-

---

[1] Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландсбергом в СССР, В. Раманом — в Индии (1928 г.).



Яков Ильич Френкель

ром) исследовал процесс выбрасывания из возбужденного атомного ядра протонов и нейтронов, а также альфа-частиц, представив этот процесс как испарения частиц с поверхности нагретого кристалла. В процессе этих исследований Я. И. Френкель впервые рассчитал ширину так называемых ядерных энергетических уровней.

В 1939 году сразу же после открытия О. Ганом, Ф. Штрасманом и Лизой Мейтнер деления ядра урана под действием медленных нейтронов Френкель дал первую количественную теорию этого явления. В том же году он пришел к выводу о возможности спонтанного деления ядра урана. Этот фундаментальный вывод был затем подтвержден опытами советских физиков Г. Н. Флерова и К. А. Петржака.

Существенным научным вкладом явились труды Я. И. Френкеля в области теории относительности, где он впервые (1926 г.) начал разрабатывать теорию движения вращающегося электрона.

В последние годы своей жизни Я. И. Френкель работал в основном в области квантовой механики, развивая теорию так называемого квантового поля.

Френкель глубоко интересовался вопросами астрофизики, биофизики и в особенности геофизики.

Работы в области геофизики, теории электрического и магнитного полей Земли (1944—1946) завершились изданием монографии, в которой Я. И. Френкель изложил свою теорию атмосферного электричества.

До последних дней жизни Яков Ильич Френкель проявлял огромную работоспособность. Наряду с большой педагогической работой многочисленными научными консультациями в разных городах Советского Союза он написал (не считая учебников) свыше двухсот оригинальных научных трудов, в том числе ряд обширных монографий по механике, электродинамике, теории относительности, квантовой механике, статистической физике, теории металлов, кинетической теории жидкостей и мн. др.

Умер Я. И. Френкель 23 января 1952 года.

ТРУДЫ Я. И. ФРЕНКЕЛЯ

Френкель Я. И. Строение материи. Ч. 1—2. Пг., «Сеятель», 1922—1924.

Ч. 1. Расчленение материи. Пг., 1922. 152 стр., илл.

Ч. 2. Вып. 1. Сочленение материи. Пг., 1924. 167 стр., илл.

Ч. 2. Вып. 2. Сочленение материи. Пг., 1924. 214 стр., илл.

Френкель Я. И. Теория относительности. Пг., «Мысль», 1923. 300 стр.

Френкель Я. И. Электрическая теория твердых тел. М., М. и С. Сабашниковы, 1924. 285 стр., илл.

Френкель Я. И. Электричество и материя. Л.—М., 1925. 176 стр., илл.

Френкель Я. И. Теория металлов. Л., 1933. 18 стр. (Акад. наук СССР. Труды ноябрьской юбилейной сессии).

Френкель Я. И. Теория твердых и жидких тел. Л.—М., Гостехтеоретиздат, 1934. 120 стр. (Проблемы новейшей физики. Вып. 14).

Френкель Я. И. Волновая механика. Ч. 1—2. Л.—М., Гостехтеоретиздат, 1934.

Френкель Я. И. Аналитическая механика. Л., Кубуч, 1935. 197 стр.

Френкель Я. И. Тепловое движение в твердых и жидких телах и теория плавления.— «Известия Акад. наук СССР. Отд-ние матем. и естеств. наук. Серия физ.», 1936, № 1—2, стр. 371—393.

Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. М.—Л., 1945. 424 стр. (Акад. наук СССР).

Френкель Я. И. Освобождение внутриатомной энергии. М.—Л., 1946 125 стр., илл. (Акад. наук СССР. Науч.-попул. серия).

Френкель Я. И. Статистическая физика. М.—Л., Акад. наук СССР, 1948. 760 стр.

Френкель Я. И. Теория жидкого состояния. Стенограмма публичной лекции, прочитанной в Центральном лектории общества в Москве. М., «Правда», 1948. 24 стр. (Всесоюз. о-во по распространению полит. и науч. знаний).

Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества. Л.—М., Гостехиздат, 1949. 152 стр.; 2 л. илл.

Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Изд. 2-е, испр. и доп. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 383 стр., илл.

Френкель Я. И. Принципы теории атомных ядер. Изд. 2-е. М.—Л., 1955. 248 стр., илл., портр. (Акад. наук СССР).

Френкель Я. И. Собрание избранных трудов. Т. 1. Электродинамика. (Общая теория электричества). Глав. ред. акад. И. Е. Тамм. М.—Л., 1956. 370 стр., портр. (Акад. наук СССР).

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Я. И. ФРЕНКЕЛЯ

Френкель Яков Ильич (1894—1952).— БСЭ, 2-е изд., т. 45, 1956, стр. 589.

Яков Ильич Френкель.— «Журн. техн. физики», 1952, т. 22, вып. 12, стр. 1905—1907, портр.

Яков Ильич Френкель.— «Журн. эксперим. и теорет. физики», 1952, т. 23, вып. 6(12), стр. 613—618, портр.

Ансельм А. И. Яков Ильич Френкель.— «Успехи физ. наук», 1952, т. 47, вып. 3, стр. 470—476, портр.

Некрологи с сжатыми обзорами работ.

ИРЭН ЖОЛИО-КЮРИ

(1897—1956)

В ряду физиков, работавших в области ядерной физики и радиохимии, особо видное место принадлежит Ирэн Жолио-Кюри. На всем творчестве Ирэн Жолио-Кюри, на ее облике как человека и ученого сказалось влияние ее родителей — замечательных французских ученых Пьера и Марии Кюри.

Ирэн Кюри родилась 12 сентября 1897 года в Париже. Она получила блестящее образование: изучала химию в Сорбонне у Перрена, математику у Ланжевена. Но главным учителем и руководителем Ирэн Кюри была ее мать — Мария Кюри, с которой она еще в детстве занималась физикой. Под руководством Марии Кюри прошли и первые годы работы Ирэн Кюри в Парижском радиевом институте, куда она поступила после окончания в 1920 году Парижского университета. В Радиевом институте Ирэн Кюри овладела искусством точного эксперимента с радиоактивными веществами. В первых своих исследованиях (1925 г.) она разработала метод определения скорости и длины свободного пробега одновременно для множества альфа-частиц, вылетающих при радиораспаде из ядра атома, и сделала ряд важных теоретических выводов. В том же 1925 году Ирэн Кюри защитила докторскую диссертацию. С 1926 года она вела научные исследования совместно со своим мужем Фредериком Жолио-Кюри, который также был учеником Марии Кюри, а в настоящее время является одним из крупнейших ученых в области физики атомного ядра.

Результаты экспериментальных исследований супругов Жолио-Кюри привели английского физика Чедвика к открытию (1932 г.) нейтрона и подтвердили существование открытого (также в 1932 г.) американским физиком Андерсоном позитрона. В процессе исследований свойств позитрона И. и Ф. Жолио-Кюри сделали крупнейшее открытие: они впервые наблюдали переход излучения в вещество, т. е. переход одной формы материи (в виде электромагнитного поля) в другую — весомую форму материи. Именно они открыли превращение гамма-кванта света (т. е.



Ирэн Жолио-Кюри

кванта света с очень высокой энергией) при его резком торможении в камере Вильсона в пару частиц — электрон и позитрон. Проведенные при этом Ф. Жолио-Кюри точные измерения блестяще подтвердили знаменитую формулу, к которой некогда пришел Д. Д. Томсон и которую затем на новой научной основе вывел Эйнштейн — формулу связи между массой и энергией ($E=mc^2$).

Опыты с бомбардировкой атомов алюминия и бора альфа-частицами привели И. и Ф. Жолио-Кюри в 1934 году к новому открытию огромного научного значения — открытию искусственной радиоактивности.

До этого были известны лишь естественные, существующие в природе радиоактивные элементы. Ядра атомов таких элементов неустойчивы и самопроизвольно испускают альфа- и бета-частицы, а иногда еще и гамма-лучи. Однако крайняя редкость этих элементов на Земле была главной причиной, не позволяющей развернуть широкие исследования радиоактивности.

В 1919 году Резерфорду при помощи бомбардировки альфа-частицами легкого элемента — азота впервые удалось искусственно осуществить ядерную реакцию. В результате этой реакции от ядра атома азота был «оторван» протон и таким образом получен изотоп другого химического элемента — кислорода. Однако и здесь, и в последующих опытах Резерфорд получал лишь уже известные, устойчивые, нерадиоактивные изотопы тех или иных химических элементов. После открытия нейтрона Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри в том же 1932 году впервые обнаружили, что при бомбардировке альфа-частицами алюминия, натрия и фтора ядра атомов этих веществ выбрасывают нейтрон и превращаются в ядра атомов изотопов, не встречающихся в природе. Продолжая исследования, Жолио-Кюри через 2 года установили, что при этих ядерных реакциях, кроме нейтрона, излучаются и позитроны, причем — и это было особенно удивительно — излучение позитронов начинается лишь через несколько минут после начала бомбардировки алюминия альфа-частицами и продолжается некоторое время после ее прекращения. В результате количественных исследований Жолио-Кюри обнаружили, что излучение позитронов в этом случае в точности подчиняется обычному закону радиоактивного распада с полупериодом в 3 мин. 15 сек. Излучающие ядра оказались ядрами атомов нового, впервые искусственно полученного радиоактивного элемента — изотопа фосфора, так называемого радиофосфора, который после недолгого существования превращается в обычный, устойчивый изотоп кремния.

И. и Ф. Жолио-Кюри показали, что таким же образом бор можно превратить в радиоазот, также испускающий позитроны, а магний — в два радиоактивных изотопа кремния: один — с обычной, электронной радиоактивностью, другой — с новым, открытым супругами Жолио-Кюри, позитронным типом радиоактивности.

Жолио-Кюри сумели химически отделить радиофосфор от алюминия и радиоазот от бора и тем самым окончательно доказали возможность получения искусственных радиоактивных изотопов известных химических элементов.

Так была открыта искусственная радиоактивность, а с ней — неограниченные возможности исследования и применения самого явления радиоактивности.

За это выдающееся открытие Ирэн и Фредерику Жолио-Кюри была присуждена в 1935 году Нобелевская премия.

Подхваченные крупнейшими физиками мира исследования искусственной радиоактивности уже в скором времени привели к важным результатам. В 30-е годы с помощью бомбардировки нейтронами (реакция Ферми) были получены, в первую очередь итальянским физиком Ферми и его сотрудниками, искусственные радиоактивные изотопы всех известных химических элементов. В дальнейшем, в 1942 году американский физик Макмиллан получил первый так называемый зауранового (или трансуранового) радиоактивный элемент с порядковым номером 93 (существование его было предсказано Ферми еще в 1935 г.). Если в 1936 году было известно до сотни искусственных радиоизотопов, а к 1940 году — около двухсот, то к 1955 их насчитывалось уже до тысячи. Искусственно полученные радиоизотопы в настоящее время нашли и продолжают находить самое широкое применение в физике, химии, биологии, геологии, сельском хозяйстве. Они оказались необходимыми в качестве горючего в атомных реакторах. В последнее время все более выявляется их колоссальное значение в медицине, где радиоактивные изотопы уже сейчас стали мощным, хотя еще далеко не полностью освоенным оружием в борьбе за жизнь человека.

После 1935 года Ирэн Жолио-Кюри, особенно в последние годы своей жизни, занималась изучением искусственной радиоактивности, вызванной нейтронами, и открыла одно из так называемых радиоактивных семейств химических элементов (ряд элементов, где каждый последующий возникает в результате самопроизвольного радиоактивного распада предыдущего).

В 1939 году Ирэн Жолио-Кюри совместно с видным югославским физиком П. Савичем установила, что одним из продуктов, получаемых в результате облучения урана нейтронами, является не трансурановый элемент, как этого ожидали, а элемент из средней части периодической системы — лантан (№ 57). Таким образом, было осуществлено деление ядра урана на две сравнимые по массе части. Эта реакция сопровождалась выделением несравненно большей энергии, чем известные до этого ядерные реакции, при которых от ядра отрывалась лишь альфа-частица. В том же году О. Ган, Ф. Штрассман и Л. Мейтнер открыли реакцию деления ядра урана медленными нейтронами, а Ф. Жолио-Кюри вскоре показал, что при делении ядра урана из него вылетает от одного до трех нейтронов, которые вызывают, в свою очередь, деление других ядер урана, вследствие чего реакция приобретает цепной характер.

С открытием деления урана ядерная реакция становилась не только еще более эффективным способом превращения элементов, но и открывала возможность освобождать колоссальную энергию атомного ядра.

В 1934 году после смерти Марии Кюри Ирэн Кюри стала ее преемницей в качестве директора Института радия, а затем и на кафедре физики

в Парижском университете. В дальнейшем она занимала руководящие должности во многих научных учреждениях Франции, вплоть до помощника статс-секретаря по научно-исследовательским делам во Французском правительстве (1936 г.). Ирэн Кюри была членом-корреспондентом Академии наук СССР (с 1947 г.), членом Бельгийской королевской академии медицины, академий наук Польши, Индии, почетным доктором наук Эдинбургского университета, университета в Осло и др.

Через всю жизнь Ирэн Жолио-Кюри пронесла не только замечательные качества ученого, но и высоко гуманистические, прогрессивные убеждения. Еще 17-летней девушкой, в годы первой мировой войны она вместе с матерью участвовала в создании первых рентгеновских и радиокабинетов для раненых. В годы фашистской оккупации Ирэн Жолио-Кюри вместе со своим мужем была в первых рядах борцов за освобождение Франции. В послевоенный период супруги Жолио-Кюри показали пример большого гражданского мужества в борьбе против использования атомной энергии в агрессивных целях. До последних дней своей жизни, несмотря на тяжелую болезнь, вызванную длительным действием радиоактивных излучений, И. Жолио-Кюри вела активную работу в качестве члена Постоянного комитета Всемирного конгресса сторонников мира и члена Всемирного Совета Мира, председателем которого является Фредерик Жолио-Кюри.

Ирэн Жолио-Кюри умерла 17 марта 1956 года.

ТРУДЫ И. ЖОЛИО-КЮРИ

Жолио-Кюри Фредерик и Ирэн. Совместные труды.— В кн.: Жолио-Кюри Фредерик. Избранные труды. М., Акад. наук СССР, 1957, стр. 96, 101, 133—134, 177—178 и др.

В книгу вошло свыше 30 классических, имеющих основополагающее значение для современной ядерной физики трудов Ирэн и Фредерика Жолио-Кюри, в том числе: «Экспериментальные доказательства существования нейтрона», «Новый вид радиоактивности» (на русском языке впервые опубликовано в «Успехах физ. наук», 1954, т. 53, вып. 1, стр. 3—6), «Искусственная радиоактивность» и др.

Жолио-Кюри И. О четвертом радиоактивном семействе.— «Известия. Акад. наук СССР. Отд-ние матем. и естеств. наук. Серия физ.», 1936, № 5, стр. 645—647.

Доклад, прочитанный на сессии физической группы Академии наук СССР по атомному ядру 27—28 сентября 1936 года.

Жолио-Кюри И. и **Жолио-Кюри Ф.** Пьер Кюри и пути развития современной науки.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 5, стр. 54—57.

Жолио-Кюри Ф. и **Жолио-Кюри И.** Радиоактивность.— БСЭ, 2-е изд., т. 35, 1935, стр. 485—495, илл.

Статья начинается разделом: История открытия природной и искусственной радиоактивности.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ И. ЖОЛИО-КЮРИ

Жолио-Кюри Ирэн.— БСЭ, 2-е изд., т. 16, 1952, стр. 204—205, портр.

Шаскольская М. П. Ирэн Жолио-Кюри.— «Физика в школе», 1956, № 4, стр. 26—29, портр.

Шаскольская М. П. Ирэн Жолио Кюри. «Успехи физ. наук», 1956, т. 59, вып. 4, стр. 583—590.

В этой статье более подробно, чем в первой, излагается история открытия искусственной радиоактивности.

Баранов В. И. Памяти Ирэн Жолио-Кюри.— «Вестник Акад. наук СССР», 1956, № 5, стр. 58—59.

Ирэн Жолио-Кюри. Некролог.— В кн.: Жолио-Кюри Ф. Избранные труды. М., Акад. наук СССР, 1957, стр. 9—10.

Иоффе А. Ф. Ирэн Кюри и Фредерик Жолио.— «Известия Акад. наук СССР. Отд-ние матем. и естеств. наук. Серия хим.», 1936, № 4, стр. 601—604.

Творческая биография супругов Жолио-Кюри. Преемственность между их открытием искусственной радиоактивности и работами Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри, открывших радий и создавших учение о радиоактивности.

Скобельцын Д. В. Открытие искусственной радиоактивности и ее роль в развитии физики за 20 лет.— «Вопросы философии», 1954, № 4, стр. 95—104.

Ратнер А. П. К 20-летию открытия искусственной радиоактивности.— «Журн. общей химии», 1954, № 11, стр. 1897—1901.

Открытие искусственной радиоактивности, ее значение для развития химии.

Алиханян А. И., Вайсенберг А. О. Искусственная радиоактивность.— «Вестник Акад. наук СССР», 1954, № 6, стр. 51—61.

История исследования радиоактивности — от открытия Анри Беккереля в 1896 году до работ Ирэн и Фредерика Жолио-Кюри. Краткий обзор дальнейших исследований советских и зарубежных ученых в области искусственной радиоактивности. Значение открытия искусственной радиоактивности для решения космогонических проблем.

ЭНРИКО ФЕРМИ

(1901—1954)

Великий итальянский физик Энрико Ферми родился 26 сентября 1901 года в Риме в семье служащего. Уже в детстве он проявлял исключительно большой интерес к занятиям физикой. Еще подростком он построил теорию движения волчка, пытался объяснить явление радуги и т. д. Когда 17-летним юношей Ферми поступил в Пизанский университет, он уже прекрасно знал классическую физику и теорию относительности. К этим годам относятся первые теоретические работы Ферми по механике и теории относительности.

Окончив в 1922 году университет, Ферми учился некоторое время в Германии и Голландии. Вернувшись в Италию, он стал преподавать физику во Флоренции. С 1928 года в течение 10 лет Ферми был профессором теоретической физики в Римском университете. Уже с первых лет самостоятельной работы проявились не только его выдающиеся качества исследователя, но и замечательный талант педагога. Лекции Ферми, как и его научные статьи и книги, отличались глубиной и предельной ясностью.

В годы работы в Римском университете Ферми создал итальянскую школу современной физики, из которой вышли многие крупные ученые, в частности Сегре, открывший антипротон и антинейтрон. На семинары Ферми по теоретической физике съезжались виднейшие иностранные физики.

В 1938 году в связи с усилившимся фашистским террором в Италии Ферми эмигрировал в США. В 1939—1945 гг. он был профессором Колумбийского, а после войны — Чикагского университетов.

Первым выдающимся научным достижением Ферми была его работа по статистической механике (1926 г.), в которой он предложил статистическую теорию движения и взаимодействия частиц, подчиняющихся так называемому «принципу Паули»[1]. Эта теория, известная в настоящее

[1] Принцип, утверждающий, что в данном квантовом состоянии физической системы в один и тот же момент может находиться не более одной частицы (например, электрона). Установлен в 1925 г. швейцарским физиком-теоретиком В. Паули.



Энрико Ферми

время под названием статистики Ферми—Дирака, впервые позволила объяснить свойства электронов в металлах; она также нашла широкое применение в атомной и ядерной физике («модель ядра по Ферми», «модель атома Томаса—Ферми» и т. д.). За эти работы Ферми в 1928 году был избран членом Королевской академии Италии и других академий, а в 1929 году — членом-корреспондентом Академии наук СССР.

После 1926 года появляется ряд важных теоретических работ Ферми, посвященных применению созданной им статистики к теории атома, теории сверхтонкой структуры спектров, квантовой электродинамике.

С 1934 года Ферми начал работать в области ядерной физики. Уже в этом году он опубликовал свою знаменитую теорию «бета-распада» — теорию процесса радиоактивного распада, при котором из ядра атома вылетает электрон (бета-частица) и, согласно предположению, впервые выдвинутому Паули, одновременно с ним — элементарная нейтральная частица — нейтрино. В своей теории Ферми впервые исследовал взаимодействие между парой частиц электрон-нейтрино и элементарными частицами, составляющими ядро атома (протоны и нейтроны) и носящими общее название «нуклоны». Классическая работа Ферми по теории бета-распада положила начало теоретическим исследованиям взаимодействия элементарных частиц.

Сразу же после открытия в 1934 году Ирэн и Фредериком Жолио-Кюри явления искусственной радиоактивности Ферми начал экспериментальные исследования этого явления.

Жолио-Кюри получали искусственные радиоактивные элементы путем «бомбардировки» атомов некоторых химических элементов массивными альфа-частицами. Ферми впервые применил вместо альфа-частиц тяжелые нейтральные частицы — нейтроны, которые свободнее проникают внутрь атома, так как не реагируют на магнитные и электрические поля в нем. Результаты этих исследований превзошли все ожидания Ферми и привели его к созданию новой области науки — нейтронной физики.

Путем бомбардировки нейтронами атомов всех известных тогда химических элементов Ферми получил свыше 60 искусственных радиоактивных элементов.

В процессе этих опытов Ферми впервые осуществил деление ядра атома урана. Однако сам он истолковал полученный им результат неправильно. Он полагал, что получил новый трансурановый химический элемент с номером 93. Ошибка была вскоре выяснена, и Ферми, отличавшийся исключительной честностью и щепетильностью в научных вопросах, тяжело переживал эту единственную в своей научной деятельности ошибку. Честь открытия реакции деления урана, которая легла впоследствии в основу промышленного производства атомной энергии принадлежит немецким физикам О. Гану, Ф. Штрассману и Л. Мейтнер (1939 г.).

В этот же период (1934—1938 гг.) Ферми сделал выдающееся открытие в области нейтронной физики. Он установил, что в веществах, содержащих большое количество водорода, происходит замедление движения нейтронов (эффект Ферми), и теоретически объяснил это явление. За исследование свойств нейтронов Ферми в 1938 году был удостоен Нобелевской премии по физике.

Продолжая работы в этой области, Ферми в 1939 году, независимо от группы физиков, работавших под руководством Ф. Жолио-Кюри, установил следующий исключительно важный факт: при делении ядра атома медленными нейтронами из ядра вылетают 2—3 быстрых нейтрона, которые, замедляясь, могут вызвать деление уже трех ядер урана и т. д. Таким образом, Ферми открыл возможность цепной реакции при делении ядер атомов урана, что привело впоследствии к созданию установки для производства атомной энергии — атомного котла (или реактора).

Ферми принадлежит разработка первой, элементарной теории атомного котла и заслуга практического осуществления первой ядерной цепной реакции. Впервые в истории науки он с сотрудниками построил ядерный реактор — новый источник энергии, где «горючим» служил уран, а замедлителем нейтронов (регулятором «горения» — реакции деления ядер) — графит. Первый реактор был запущен 2 декабря 1942 года на площадке Чикагского университета. Впоследствии его перенесли в Аргонискую лабораторию близ Чикаго, где он используется для научных целей и в настоящее время (мощность его достигает 100 киловатт при непрерывной работе не более двух часов).

Это величайшее научное достижение Ферми открыло новую эпоху в физике и технике, позволив приступить к практическому использованию неисчерпаемых запасов атомной энергии вещества.

После войны, используя построенный им ядерный реактор как источник нейтронов, Ферми заложил основы нейтронной оптики, продолжая заниматься изучением взаимодействия нейтронов и электронов.

В последние годы своей жизни Ферми со свойственной ему настойчивостью работал в области физики элементарных частиц с высокими энергиями — частиц, разгоняемых до огромных скоростей в ускорителях или приходящих на Землю в виде космических лучей. Ферми исследовал в основном свойства мезонов — неустойчивых элементарных частиц, положительно или отрицательно заряженных, а также нейтральных, с массою, средней между массами электрона и протона.

Наиболее выдающимися работами Ферми в эти годы являются созданные им статистическая теория ускорения первичных частиц в космических лучах (1949 г.) и теория множественного образования мезонов при соударениях частиц, обладающих очень высокими энергиями (1950 г.). В начале 50-х годов Ферми с сотрудниками провел ряд фундаментальных экспериментальных исследований взаимодействия мезонов и нуклонов, в частности, рассеяния положительных и отрицательных π-мезонов разных энергий протонами (1953 г.).

В течение всей своей деятельности Ферми всегда был на переднем крае науки и, благодаря исключительной интуиции в области физики и выдающемуся экспериментаторскому мастерству, одержал блестящие победы, овладевая новыми рубежами физики, открывая новые области исследования.

Умер Ферми 28 ноября 1954 года.

ТРУДЫ Э. ФЕРМИ

Ферми Э. Молекулы и кристаллы. Пер. с нем. М. И. Певзнер. Под ред. В. Б. Берестецкого. М., Гос. изд. иностр. лит., 1947. 266 стр., илл.

Опубликовано на немецком языке в 1938 году.

Ферми Э. Элементарная теория котлов с цепными ядерными реакциями (Пер. с англ.).— «Успехи физ. наук», 1947, т. 32, вып. 1, стр. 54—65.

Ферми Э. Ядерная физика. Пер. с англ. М., Изд. иностр. лит., 1951. 343 стр., илл.

Книга представляет собою запись курса по ядерной физике, прочитанного Ферми в Чикагском университете в 1949 году. Перевод сделан со 2-го издания, вышедшего в 1950 году.

Ферми Э. Лекции по атомной физике. Пер. с итал. А. С. Компанейца. М., Изд. иностр. лит., 1952. 124 стр., илл.

Обработанные стенограммы лекций Ферми, прочитанных им в 1949 году в Италии. Впервые опубликовано в 1950 году.

Ферми Э. Элементарные частицы. Пер. с англ. Изд. 2-е. М., Изд. иностр. лит., 1953. 103 стр.

Основой этой книги являются лекции, прочитанные автором в Йельском университете в 1950 году для студентов-физиков. Опубликовано впервые в 1951 году.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТРУДАХ Э. ФЕРМИ

Ферми Энрико (1901—1954).— БСЭ, 2-е изд., т. 44, 1956, стр. 630, портр.

Понтекорво Б. Энрико Ферми (1901—1954). К годовщине смерти.— «Успехи физ. наук», 1955, т. 57, вып. 3, стр. 349—359, портр.

АЛФАВИТНЫЙ СПИСОК ФИЗИКОВ [1]

Ампер А. 151
Архимед 19
Беккерель А. 291
Бойль Р. 59
Больцман Л. 268
Вавилов С. И. 410
Вебер В. 189
Вольта А. 133
Галилей Г. 31
Гальвани Л. 129
Гельмгольц Г. 217
Герц Г. 311
Гиббс Д. 254
Гильберт В. 25
Гук Р. 72
Гюйгенс Х. 65
Декарт Р. 42
Джоуль Д. 207
Карно С. 184
Кирхгоф Г. 231
Клаузиус Р. 225
Кулон Ш. 124
Кавендиш Г. 119
Кюри И. 424
Кюри П. 327
Ландсберг Г. С. 403
Ланжевен П. 365
Лебедев П. Н. 347
Ленц Э. Х. 194
Ломоносов М. В. 97
Лоренц Г. 296
Майер Р. 200
Максвелл Д. 246
Мандельштам Л. И. 383
Ньютон И. 77
Ом Г. 164
Паскаль Б. 54
Петров В. В. 140
Планк М. 320
Попов А. С. 338
Резерфорд Э. 357
Рентген В. 275
Рихман Г. 108
Рождественский Д. С. 377
Склодовская-Кюри М. 327
Смолуховский М. 372
Столетов А. Г. 259
Томсон Д. 304
Томсон У. 237
Торричелли Э. 50
Умов Н. А. 282
Фарадей М. 175
Ферми Э. 430
Франклин В. 90
Френель О. 169
Френкель Я. И. 419
Фридман А. А. 398
Фуко Л. 212
Эйнштейн А. 390
Эпинус Ф. 114
Эрстед Г. 159
Юнг Т. 146

[1] Цифры означают страницы настоящего пособия.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	7
Общие труды по истории физики	11
Выдающиеся физики мира (в хронологическом порядке)	17
Алфавитный список физиков	43

«ВЫДАЮЩИЕСЯ ФИЗИКИ МИРА»

Художники Л. Пушина и А. Иозефович

Технический редактор Л. М. Хелемская

Корректоры: Л. П. Васильева, Е. С. Гудкова, В. В. Розманинская

А04101 Подп. к печ. 25/IV 1958 г.
Объем 27,25 печ. л. (32,16 усл. п. л.), 32,7 уч.-изд. л.
Тираж 8500 экз. Цена 15 р. 10 к. Заказ № 179

Типография Библиотеки имени В. И. Ленина