А. ПАЙС

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ЖИЗНЬ Альберта ЭЙНШТЕЙНА

ББК 22.3г
П12
УДК 53(091)

ПАИС А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна: Пер. с англ./Под ред. акад. А. А. Логунова.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.— 568 с.— ISBN 5-02-014028-7.

Наиболее полная научная биография великого ученого. Подробно анализируются все основные труды создателя СТО и ОТО. Увлекательно и непринужденно, в доступной широкому кругу читателей форме автор, известный американский физик, рассказывает о становлении и развитии молекулярно-кинетической теории, квантовой теории, СТО и ОТО, попытках создания единой теории поля. Книга содержит богатейший справочный материал, обширную библиографию, ранее не публиковавшиеся отрывки из статей, хранящихся в архиве А. Эйнштейна. Личные впечатления автора от общения с А. Эйнштейном представят особый интерес для читателя.

Книга переведена на несколько языков, в 1983 г. удостоена премии Американского физического института.

Для физиков (научных работников, аспирантов, студентов), представителей смежных профессий и читателей, интересующихся историей науки и жизнью замечательных людей.

Ил. 17. Библиогр.: 1836 назв.

Рецензент кандидат физико-математических наук *В. А. Белоконь*

П $\frac{1604010000-055}{053(02)-89}$ 84-89

ISBN 5-02-014028-7

© Oxford University Press, 1982
© Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, Перевод на русский язык, предисловие и примечания, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга известного американского физика-теоретика, члена Национальной академии наук, профессора А. Пайса о жизни и научной деятельности Альберта Эйнштейна очень интересна. Это первая научная биография о творческой деятельности Эйнштейна. Она содержит много нового фактического материала. В ней сделана серьезная попытка изложить зарождение и развитие некоторых физических идей, оказавших большое влияние на формирование современных представлений. В последние годы, изучая работы Пуанкаре, я увидел, что его роль в создании физической теории гораздо больше, чем это можно заключить из книги. Вклад Пуанкаре в создание теории относительности подробно рассмотрен мною и изложен в книге «К работам Анри Пуанкаре о динамике электрона», поэтому на этом вопросе я останавливаться здесь не буду.

О Гильберте проф. А. Пайс пишет в гл. 14 (см. с. 251): «Очевидно, и Гильберт не был знаком с тождествами Бьянки!», и далее в § 15.3 он подчеркивает: «Итак, я утверждаю, что ни Гильберт, ни Эйнштейн не знали тождеств Бьянки в тот критический ноябрь 1915 г.»

Поскольку это тождество имеет фундаментальное значение для общей теории относительности, мы остановимся на нем подробнее, точно следуя Гильберту. С тем, что Эйнштейн не знал тождества Бьянки, можно полностью согласиться. Этот вывод проф. Пайса правилен. Что же касается Гильберта, то это тождество он доказал сам. Более того, он установил общее тождество, откуда в частном случае он и получил тождество, называемое в литературе тождеством Бьянки. В работе Гильберта (1915 г.) доказана специальная теорема. Формулировка ее такова:

«Теорема III. Пусть J — инвариант, зависящий *только* от компонент $g^{\mu\nu}$ и их производных, а через $[\sqrt{g}J]_{\mu\nu}$, как и прежде, обозначены вариационные производные от $\sqrt{g}J$ по $g^{\mu\nu}$. Тогда, если $h^{\mu\nu}$ — любой контравариантный тензор, то величина

$$\frac{1}{\sqrt{g}}\sum_{\mu,\nu}[\sqrt{g}\,J]_{\mu\nu}h^{\mu\nu}$$

'Subtle is the Lord . . .'

THE SCIENCE AND THE LIFE OF Albert EINSTEIN

Abraham PAIS
Rockefeller University

OXFORD UNIVERSITY PRESS
Oxford New York Toronto Melbourne
1982

53
П-12

А. ПАЙС

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ЖИЗНЬ Альберта ЭЙНШТЕЙНА

Перевод с английского
В. И. и О. И. МАЦАРСКИХ

Под редакцией академика
А. А. ЛОГУНОВА

БИБЛИОТЕКА
Вуз. ТИП и ДП
№ 63903

МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1959

Знания, щедрость, мудрость и критика многих людей оказали мне в работе неоценимую помощь. Всем им я выражаю искреннюю благодарность. Больше всех мне помогла Элен Дюкас, незаменимый гид по хранящемуся в Принстоне архиву Эйнштейна, лучше других знакомая с его жизнью. Благодарю Вас, дорогая Элен, Вы были великолепны! Мне очень помогли Рес Йост, Сэм Трейман и Джордж Уленбек; они прочли рукопись почти целиком, сделали множество ценных замечаний и всячески ободрили меня. С благодарностью отмечаю беседы с Валентином Баргманом, Банешем Хофманом и Эрнестом Страусом о жизни Эйнштейна, общей теории относительности и единой теории поля; беседы с Робертом Дикке, Питером Хавасом, Малькольмом Перри, Деннисом Шамой и Джоном Стачелом о теории относительности; с Арманом Борелем о Пуанкаре; с Эдди Коэлом, Марком Кацем, Мартином Клейном о статистической физике; с Анной Кокс о Лоренце; с Гаральдом Черниссом и Феликсом Гильбертом на все темы от греческой атомистики до Веймарской республики. Особую благодарность хочу выразить Беату Глаусу из Цюрихского политехникума и Гюнтеру Рашу из Цюрихского университета за помощь в архивных изысканиях в Цюрихе. Всем им и многим другим, кто отвечал на мои вопросы и вдохновлял меня своими замечаниями: спасибо!

Эта книга была закончена в Институте высших исследований в Принстоне. Выражаю благодарность Гарри Вулфу за гостеприимство и предоставление средств из директорского фонда. Я очень обязан фонду Альфреда П. Слоуна за материальную поддержку при подготовке рукописи. Чрезвычайно признателен фонду Эйнштейна за разрешение цитировать неопубликованные работы, а также фонду Паули, Государственному архиву в Гааге (переписка Лоренца), музею Бурхаве в Лейдене (переписка Эренфеста). Благодарю также Королевский Нобелевский комитет в Стокгольме, в особенности Бенгта Нагеля, за предоставление документации по присуждению Эйнштейну Нобелевской премии.

Большую помощь и поддержку мне оказывала моя жена Сара.

Текст этого предисловия я сохранил в том виде, в котором он был написан до смерти Элен Дюкас, последовавшей 10 февраля 1982 г.

А. Пайс

Глава 1. ЦЕЛЬ И ПЛАН

Было это году в пятидесятом. Я провожал Эйнштейна из Института высших исследований домой. Внезапно он остановился, повернулся ко мне и спросил: «А по-вашему, Луна существует, только когда на нее смотришь?»

Наш разговор в общем не касался метафизических материй; скорее, мы говорили о квантовой теории, в частности о том, что можно понять и сделать на основе физических наблюдений. Физик XX в. вряд ли станет утверждать, что может однозначно ответить на этот вопрос. Между тем его совсем не устраивает ответ, который давали его предшественники в XIX в. Конечно, они почти всегда были правы в том, что касалось явлений повседневной жизни, но их выводы нельзя распространить на объекты, движущиеся с околосветовой скоростью, а также на объекты столь малые, как атом, или (в некотором отношении) на такие массивные, как звезды. Теперь мы понимаем — то, что можно сделать при самых благоприятных условиях, зависит от тщательнейшего определения самих этих условий. Таков, в общих чертах, основной вывод, следующий из созданной Эйнштейном теории относительности и из квантовой механики, которую он в конце концов принял как наиболее удачную для того периода теорию, хотя и считал, что она имеет лишь переходный характер.

Мы все шли и продолжали рассуждать о Луне и о смысле слова *существовать* применительно к неодушевленным предметам. Около дома № 112 по Мерсер-стрит я пожелал ему приятного аппетита и отправился обратно в институт. От прогулки я, как всегда, получил огромное удовольствие, а беседа придала мне бодрости, хотя мы и не пришли ни к каким выводам. К этому я уже привык и на обратном пути в который раз подумал: почему же этот человек, внесший колоссальный вклад в создание современной физики, так держится за взгляды на причинность, господствовавшие в XIX в.?

Для того чтобы точнее сформулировать этот вопрос, необходимо понять кредо Эйнштейна по отношению не только к квантовой физике, но и к физике вообще. Надеюсь, мне это удалось, и дальше я попытаюсь поделиться своими мыслями с читателем. Однако, чтобы ответить на поставленный вопрос, недостаточно знать только убеждения Эйнштейна, нужно понять,

также будет инвариантом; если подставить в эту сумму вместо $h^{\mu\nu}$ стандартный тензор $p^{\mu\nu}$ и написать

$$\sum_{\mu,\nu}[\sqrt{g}\,J]_{\mu\nu}\,p^{\mu\nu}=\sum_{s,l}(i_s p^s+i_s^l p_l^s),$$

где конструкции

$$i_s=\sum_{\mu,\nu}[\sqrt{g}\,J]_{\mu\nu}\,g_s^{\mu\nu},$$

$$i_s^l=-2\sum_{\mu}[\sqrt{g}\,J]_{\mu s}\,g^{\mu l}$$

зависят только от $g_{\mu\nu}$ и их производных, то

$$i_s=\sum_{l}\frac{\partial i_s^l}{\partial\omega^l}, \tag{7}$$

причем данное уравнение выполняется тождественно для всех аргументов, а именно для $g^{\mu\nu}$ и их производных».

Эта теорема вариационным методом доказана в работе Гильберта 1915 г. Тождество имеет общий вид для любого инварианта J, зависящего только от компонент $g^{\mu\nu}$ и их производных. Гильберт далее вводит инвариант K (сейчас мы обычно пишем R), следующий из тензора Римана (скалярная кривизна четырехмерного многообразия):

$$K=\sum_{\mu,\nu}g^{\mu\nu}K_{\mu\nu},$$

получает выражение

$$[\sqrt{g}\,K]_{\mu\nu}=\sqrt{g}\left(K_{\mu\nu}-\frac{1}{2}\,g_{\mu\nu}K\right)$$

и далее пишет: «Так как инвариант K зависит только от $g^{\mu\nu}$ и их производных, согласно теореме III, должно тождественно выполняться (7), причем

$$i_s=\sum_{\mu,\nu}[\sqrt{g}\,K]_{\mu\nu}\,g_s^{\mu\nu}, \tag{24}$$

$$i_s^l=-2\sum_{\mu}[\sqrt{g}\,K]_{\mu s}\,g^{\mu l}\qquad(\mu=1,2,3,4).» \tag{25}$$

Но тождество (7) с учетом выражений (24) и (25) есть не что иное, как тождество Бьянки (15.4). Таким образом, утверждение Пайса, что Гильберт не был знаком с тождеством Бьянки, неверно. Что касается утверждения Пайса в § 14.4, что Гильберт неверно понял смысл своей теоремы I, то это также неправильно. Смысл этой теоремы состоит в том, что уравнения движения вещества, если их не больше четырех, следуют точно из гравитационных уравнений. Именно это ясно понимал Гильберт. Впоследствии Эйнштейн с сотрудниками именно из гравитационных уравнений нашел уравнения движения для вещества

в постньютоновом приближении. Наиболее изящно и независимо от Эйнштейна эта задача была решена В. А. Фоком.

Пайс в § 15.3 пишет: «...в 1917 г. специалисты еще не знали, что вывод уравнения (15.4) (тождество Бьянки.— *А. Л.*), данный Вейлем вариационным методом...». Но это также неверно, поскольку вариационный вывод тождества (15.4) впервые дал Давид Гильберт в 1915 г., а не Вейль в 1917 г.

Мои замечания не умаляют ценности книги. История создания теории относительности уточняется, и это должен иметь в виду читатель. Профессор А. Пайс написал превосходную книгу, и мы все благодарны автору за нее. Книга является хорошим путеводителем для тех, кто захочет сам разобраться в сути дела.

Академик А. А. Логунов

Февраль 1989 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

На протяжении всей сознательной жизни А. Эйнштейн стремился к достижению гармонии в отношениях между народами. Поэтому мне особенно приятно, что моя книга об этом замечательном человеке выходит на русском языке.

Я не раз бывал в Советском Союзе, где меня всегда тепло и гостеприимно принимали. В вашей стране у меня есть добрые друзья, но, увы, я так и не овладел русским языком. К счастью, за перевод моей книги взялись Виталий и Ольга Мапарские. В ходе многочисленных обсуждений я убедился, что они прекрасно чувствуют английский текст. Пользуюсь случаем, чтобы поблагодарить их за все усилия.

Надеюсь, дорогой советский читатель, что эта книга поможет вам поближе познакомиться с одной из самых выдающихся личностей нашего столетия.

А. Пайс

Рокфеллеровский университет, Нью-Йорк, январь 1988 г.

Саре, Джошуа и Даниэлю
посвящается...

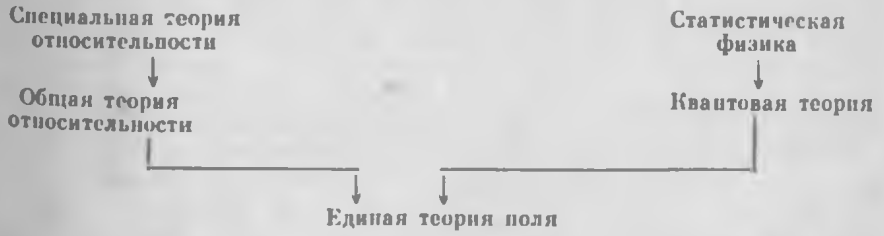
К ЧИТАТЕЛЮ

Названия некоторых глав в оглавлении выделены курсивом. Они посвящены биографии Эйнштейна, и о науке там речь практически не идет. В первой главе я проведу читателя с экскурсией по книге, не вдаваясь в технические детали обсуждаемых вопросов, а также поделюсь некоторыми личными воспоминаниями и выскажу ряд общих соображений.

Главная цель моей книги — изложить научную биографию Альберта Эйнштейна. Я напомню представления, существовавшие в физике в те времена, когда Эйнштейн начинал свою деятельность, расскажу о том, как он изменил эти представления и какое оставил научное наследие. У моего рассказа нет конца, поскольку в трудах Эйнштейна поставлен ряд нерешенных до сих пор фундаментальных проблем. Поиск их решений ведется на переднем крае современной физики. Некоторые вопросы нельзя обсуждать, не прибегая к математике, но я старался свести математические выкладки к минимуму, отсылая читателя везде, где это возможно, к общеизвестным работам.

Именно наука составляла смысл жизни Эйнштейна; ей он был предан, в ней находил убежище, она была причиной его обособленности. Чтобы понять, каким человеком был Эйнштейн, необходимо прежде всего проследить за ходом его научного мышления и творчества. Но этого мало. Эйнштейн обладал, кроме того, даром превосходно излагать свои мысли на немецком языке, он любил музыку, интересовался философией. Его глубоко волновали судьбы человечества. (В последние годы жизни он называл ежедневное чтение газеты «New York Times» инъекцией адреналина.) Он был мужем, отцом, отчимом. Он был евреем. Он стал легендой. Обо всем этом рассказано в книге.

Если бы меня попросили написать биографию Эйнштейна одной фразой, то она выглядела бы так: «Я никогда не встречал человека свободнее его». Если бы мне понадобилось выразить в одной фразе его научную биографию, я написал бы: «Он как никто другой умел находить инварианты и пользоваться статистикой флуктуаций». Если бы мне пришлось выбирать единственную иллюстрацию, я выбрал бы такую:



и дал бы к ней подпись: «Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна». Его величие, прозорливость, слабости — все воплощено в этой иллюстрации. Моя книга представляет собой попытку расшифровать эту упрощенную схему. В конце книги она появится вновь.

как он к ним пришел. Беседы с Эйнштейном мне тут не помогли, и не потому, что мы умышленно обходили этот вопрос, нет, просто он никогда не возникал. Лишь спустя много лет после смерти Эйнштейна я начал догадываться, как на него можно ответить. Произошло это, когда я понял главное: еще лет за десять до создания современной квантовой механики Эйнштейн первым осознал, что понятие причинности, существовавшее в XIX в., станет в квантовой физике предметом серьезных разногласий. И все же, хотя сейчас об эволюции его мышления мне известно гораздо больше, чем во времена наших прогулок, я не могу утверждать, что знаю, как именно он пришел к своим убеждениям. В 50 лет Эйнштейн написал в предисловии к своей биографии, принадлежащей перу его зятя Рудольфа Кайзера: «...что, по всей видимости, не было замечено, так это то иррациональное, противоречивое, нелепое и, в общем, даже нездоровое, что неисчерпаемо изобретательная природа вложила в одного индивидуума, сделав это, скорее всего, ради собственного развлечения. Но выделить все подобные вещи можно только в горниле собственного разума»[1]). Может быть, такое утверждение о возможностях познания самого себя слишком оптимистично, но оно, несомненно, служит справедливым предостережением — имея право поставить любой вопрос, биограф не должен добывать на него ответ любой ценой.

Поясню вкратце, как получилось, что я гулял с Эйнштейном, и почему мы заговорили о Луне. Я родился в Амстердаме в 1918 г. В 1941 г. под руководством Леона Розенфельда защитил в Утрехте докторскую диссертацию. Вскоре после этого мне пришлось скрываться в Амстердаме, но в конце концов меня схватили и бросили в гестаповскую тюрьму. Тех, кого не успели казнить, освободили незадолго до победы. Сразу же после войны я обратился за разрешением поработать в Институте Нильса Бора в Копенгагене и в Институте высших исследований в Принстоне, где я надеялся встретиться с Паули. Оба института прислали мне приглашения; сначала я направился в Копенгаген и вскоре уже работал с Бором. Приведу несколько строк из моих записей того времени, которые относятся к предмету нашего обсуждения. «Следует признать, что на ранних этапах нашего сотрудничества я довольно долго не улавливал хода мыслей Бора и часто бывал обескуражен. Я не мог понять, зачем он рассказывает о том, что в 1927 г. Шрёдингера поразило вероятностное толкование квантовой механики, и почему он упоминает о каком-то возражении Эйнштейна 1928 г., которое явно не имело отношения к обсуждаемому вопросу. Но вскоре туман стал рассеиваться. Я начал ухватывать не только нить рассуждений Бора, но и их цель. Подобно спортсмену, разминающемуся перед

---

[1]) Здесь и далее все цитаты из работ Эйнштейна, переведенных на русский язык, приводятся по изданию «Альберт Эйнштейн: Собрание научных трудов».— М.: Наука, 1965—1967.— Т. 1—4.— *Примеч. пер.*

выходом на площадку, Бор заново переживал ту борьбу, которая происходила до принятия и признания квантовой механики. Можно даже сказать, что для Бора эта борьба каждый день начиналась сызнова. Мне кажется, в этом и заключался неиссякаемый источник своеобразия личности Бора. Эйнштейн всегда был его основным оппонентом — даже после смерти Эйнштейна Бор продолжал спорить с ним, как с живым» [P1].

Приехав в сентябре 1946 г. в Принстон, я узнал, что Паули вернулся в Цюрих. В том же месяце в Принстон приехал и Бор. Оба мы были приглашены на торжества, посвященные 200-летию Принстона. Я упустил случай впервые посмотреть на Эйнштейна, когда он шел рядом с президентом Трумэном во время «академической процессии». Вскоре Бор представил меня Эйнштейну, который весьма дружелюбно приветствовал перепуганного молодого человека. Разговор довольно быстро перешел на проблемы квантовой теории. Я стоял и слушал их спор. Не помню подробностей, но память сохранила первое впечатление: они любили и уважали друг друга. Не слушая собеседника, каждый с жаром говорил о своем. Как прежде я не понимал Бора, так теперь не понял Эйнштейна.

Спустя некоторое время я встретил Эйнштейна у входа в институт, признался, что не мог понять сути его спора с Бором, и попросил разрешения зайти к нему в кабинет для разъяснений. Эйнштейн предложил мне проводить его домой. Так начались наши беседы, закончившиеся незадолго до его смерти [2]). Я заходил к нему в кабинет или сопровождал его (часто вместе с Куртом Гёделем) во время предобеденных прогулок до Мерсер-стрит. Дома у него я бывал реже. Как правило, виделись мы раз в несколько недель. Разговаривали всегда по-немецки, на языке, позволявшем уловить все оттенки мыслей Эйнштейна и оценить его индивидуальность. У меня он побывал один-единственный раз, в 1954 г., когда сотрудники факультета собрались, чтобы составить проект заявления по делу Оппенгеймера.

Тому, кто знал Эйнштейна, общение с ним доставляло удовольствие. Разумеется, он прекрасно понимал, что в глазах всего мира давно стал легендарной личностью, но относился к этому спокойно. В его поведении не было ничего, что подкрепляло бы уже сложившиеся мифы, а собственная слава его совершенно не волновала. В частной беседе он иногда выражал недовольство, когда его именем злоупотребляли. Припоминаю случай с профессором X, который, как утверждали газеты, нашел решение полученных Эйнштейном обобщенных уравнений гравита-

---

[2]) Мое пребывание в институте частично потеряло свою привлекательность, когда оттуда уехал Паули. Я подумывал о возвращении в Европу, но тут Роберту Оппенгеймеру предложили занять пост директора института, а он, в свою очередь, предложил мне объединить наши усилия, чтобы придать размах работам в области физики. Я согласился и через год подписал контракт, а в 1950 г. стал профессором в этом же институте, где и оставался до 1963 г.

ционного поля. Эйнштейн сказал мне: «Der Mann ist ein Narr» («он просто дурак»),— и добавил, что X умеет считать, но не умеет думать. X пришел к Эйнштейну, чтобы обсудить свою работу, и тот, как всегда, вежливо, заметил, что полученный результат будет иметь большое значение, если, конечно, подтвердится. Эйнштейн расстроился, когда первая часть его высказывания была процитирована в газетах без оговорки. Он решил промолчать, но больше с X не встречаться. Как объяснял Эйнштейн, вся эта история началась из-за того, что преисполненный энтузиазма X передал слова Эйнштейна некоторым из коллег, а те в свою очередь поспешили использовать их для рекламы своего университета.

В глазах тех физиков, которые понимали ход его мыслей и были с ним знакомы, ореол легендарности, окружавший Эйнштейна, никогда не имел большого значения, но время от времени все же давал о себе знать. Помню, как в 1947 г. я читал в институте лекцию о недавно открытых π- и μ-мезонах (мюонах.— *Ред.*). Эйнштейн вошел уже после того, как я начал говорить. На несколько мгновений я лишился дара речи, борясь с острым чувством нереальности происходящего. Примерно то же случилось и во время работы симпозиума[3]), проходившего в Принстоне 19 марта 1949 г. по случаю 70-летнего юбилея Эйнштейна. Мы уже сидели, когда вошел Эйнштейн. На мгновение в зале воцарилась полная тишина, а потом все встали, приветствуя его.

Думаю, что такая реакция была типичной не только для молодежи. Несколько раз я разговаривал с Эйнштейном в присутствии Паули, отнюдь не страдавшего застенчивостью, но и в его поведении что-то немного менялось. Чувствовалось, насколько он почитает Эйнштейна. Поведение Бора, несмотря на научные разногласия, было примерно таким же.

Мы с Эйнштейном могли обсуждать что угодно, но в конце концов неизбежно возвращались к физике. Мы лишь изредка касались прошлого; в основном же говорили о настоящем и о будущем. Когда речь шла о теории относительности, он часто заговаривал о своих попытках объединить тяготение и электромагнетизм, о путях исследований, которые считал перспективными. Его вера в правильность избранного пути была практически непоколебима. Лишь однажды он сказал мне примерно следующее: «Я не уверен, что дальнейшего прогресса удастся добиться в рамках дифференциальной геометрии, но если это возможно, то я, кажется, на правильном пути». (Скорее всего это замечание было сделано им в последние годы жизни.)

Главным предметом обсуждений была квантовая физика. Эйнштейн постоянно размышлял о сути квантовой теории. Мы все время возвращались к квантовой теории и ее толкованию.

---

[3]) Докладчиками были Р. Оппенгеймер, И. А. Раби, Ю. П. Вигнер, Г. П. Робертсон, Дж. М. Клеменс и Г. Вейль.

Он совершенно недвусмысленно заявлял, что господствующие представления нельзя считать непогрешимыми, но мог высказывать свое несогласие и более завуалированно. Например, он никогда не называл волновую функцию *die Wellenfunktion*, а всегда использовал математический термин *die Psifunktion* (пси-функция). Мне ни разу не удалось возбудить в нем особого интереса к новым частицам, которые вышли на авансцену в конце 40-х и, особенно, в начале 50-х годов. Он явно считал, что беспокоиться по этому поводу рано и что эти частицы в конечном счете появятся в решениях уравнений единой теории поля. Весьма вероятно, что отчасти он был прав.

Самое интересное, что я вынес из бесед с Эйнштейном,— это ход его рассуждений и до некоторой степени, что он за человек. Я не был его сотрудником, поэтому наши дискуссии не ограничивались какой-то конкретной проблемой. Мы говорили о физике и часто обсуждали вопросы специального характера. Довольно редко затрагивали статистическую физику, ту область, в которую он внес столь большой вклад, но которая больше его практически не интересовала. Специальной и общей теорий относительности мы касались лишь изредка, ведь в то время казалось, что основные результаты уже установлены. Вспомните, что новый всплеск интереса к ОТО начался уже после смерти Эйнштейна. Прекрасно помню его рассказ о Лоренце, человеке, в какой-то мере игравшем в его жизни роль отца; как-то речь зашла и о Пуанкаре. Часто мы спорили о квантовой теории — эта тема его волновала больше, чем меня. Мне понадобилось немного времени, чтобы ухватить суть диалога Эйнштейн — Бор: дополнительность по отношению к объективной реальности. После неоднократных бесед с ними я понял, что появление в 1925 г. квантовой механики привело к гораздо более резкому разрыву с прошлыми представлениями, чем создание СТО в 1905 г. или ОТО в 1915 г. Раньше я этого не понимал, поскольку принадлежу к поколению, которое получило квантовую механику уже «в готовом виде». Мне стало ясно, как я заблуждался, разделяя распространенное мнение, будто бы Эйнштейну нет больше дела до квантовой теории. Напротив, он не желал ничего иного, кроме создания единой теории поля, которая не только объединила бы гравитационные и электромагнитные силы, но и заложила бы основы нового толкования квантовых явлений. О теории относительности он говорил спокойно, о квантовой теории — со страстью. Квантами он был одержим. Гораздо позже я узнал, что однажды Эйнштейн сказал своему другу Отто Штерну: «Я думал о квантовых проблемах в сто раз больше, чем об общей теории относительности» [J1]. Исходя из личного опыта, могу сказать, что это заявление меня нисколько не удивляет.

Мы говорили не только о физике, но и о политике, об атомной бомбе, о судьбе евреев и о менее важных вещах. Однажды я рассказал Эйнштейну еврейский анекдот. Он так смеялся, что

я начал собирать для него анекдоты. Я рассказывал их, и его лицо менялось. Он вдруг молодел и становился похожим на проказливого школьника. Когда я добирался до соли, он разражался довольным смехом, память о котором мне особенно дорога.

Не думать о прошлом — привилегия молодости. В годы знакомства с Эйнштейном я не читал его статей, поскольку уже знал из них все, что нужно знать физику, и не нуждался в том, что считал лишним. Теперь-то я понимаю, сколько интересных вопросов я мог бы ему задать, если бы не мое поразительное невежество. Сколько интересного я бы узнал! Да, за все приходится расплачиваться... Наши разговоры никогда не были интервью, предназначенными для истории. Они касались «живой» физики, и я рад, что дело обстояло именно так.

Шли годы, и по мере того, как я читал статьи Эйнштейна, рос и мой интерес к нему как к исторической личности. Так и получилось, что я начал изучать его научную деятельность и жизнь от конца к началу. Постепенно я стал понимать основную трудность, с которой сталкиваешься при изучении истории науки: надо на время забыть, что было потом. Размышления над статьями и архивом Эйнштейна, беседы с людьми, которые его знали, личные воспоминания — вот что помогло мне написать эту книгу. Не боясь показаться неблагодарным или неучтивым, признаюсь, что изучение научных трудов дало мне неизмеримо больше, чем что-либо иное.

В предисловии я пообещал провести вас с экскурсией по этой книге. Итак, в путь. Такие символы, как [B1], относятся к списку литературы, разбитому по главам, который помещен в конце книги.

Начну с рассказа о том, как в мое повествование вплетается биография Эйнштейна. Ранний период, от рождения Эйнштейна в 1879 г. до начала в 1908 г. его академической карьеры в качестве приват-доцента в Берне, описан в гл. 3, где содержится очерк его детства, школьных лет (вопреки распространенному мнению он получал высокие оценки как в начальной, так и в средней школе), там же говорится о кратком религиозном периоде, о студенческих днях, долгих поисках работы, о большей части периода работы в патентном бюро в Берне, о смерти отца, о женитьбе на Милеве Марич, о рождении первого сына. В § 10.1 рассказано о его жизни, начиная с того момента, когда он стал приват-доцентом в Берне, до окончания его деятельности экстраординарного профессора Цюрихского университета в марте 1911 г. В этот период родился его второй сын. Параграф 11.1 посвящен тому времени, когда Эйнштейн был профессором в Праге (с марта 1911 по август 1912 г.). В § 12.1 мы последуем за ним обратно в Цюрих, где он занимал пост профессора в Федеральном технологическом институте (политехникуме) с августа 1912 г. по апрель 1914 г. Обстоятельства, вызвавшие пере-

езд из Цюриха в Берлин, разрыв с Милевой и отношение к событиям первой мировой войны описаны в § 14.1. История пребывания в Берлине отражена в гл. 16, которая заканчивается отъездом Эйнштейна из Европы. На этот период приходятся годы болезни, которые, однако, мало повлияли на его научную продуктивность, развод с Милевой и женитьба на двоюродной сестре Эльзе, смерть матери в его берлинском доме (§ 16.1). Вслед за этим в § 16.2, 16.3 рассказано о том, как в 1919 г. Эйнштейн (гениальность которого уже признавалась его коллегами) внезапно приобрел всемирную славу, а также о моих взглядах на причины этого поразительного явления. Параграф 16.4 посвящен его неустроенной жизни в Берлине в 20-е годы, пробуждению его интереса к судьбе еврейского народа и движению пацифистов, отношению к Лиге Наций, а завершается он окончательным отъездом Эйнштейна из Германии в декабре 1932 г. Бельгийская интерлюдия и первые годы пребывания в Принстоне описаны в § 25.2; о последних годах жизни речь идет в гл. 26—28. Книга заканчивается подробным перечнем дат основных событий жизни Эйнштейна.

Прежде чем провести такую же экскурсию по научной части книги, я хотел бы сделать несколько замечаний об отношении Эйнштейна к политике, а также об Эйнштейне — философе и гуманисте.

Когда я думаю об Эйнштейне и политике, мне вспоминается одна из наших встреч. Дело было вечером в воскресенье 11 апреля 1954 г. Утром в «New York Herald Tribune» появилась статья братьев Олсоп, озаглавленная «Следующая мишень Маккарти — ведущий физик». Начиналась она сообщением о том, что молодой сенатор от штата Висконсин готов разыграть свою козырную карту. Я уже знал, что вот-вот начнется дело Оппенгеймера. Вечером, когда я работал у себя в кабинете, зазвонил телефон и вашингтонская телефонистка попросила позвать доктора Оппенгеймера. Я ответил, что Оппенгеймера в городе нет. (Он, кстати, находился в то время в Вашингтоне.) Затем телефонистка попросила к аппарату доктора Эйнштейна. Я ответил, что Эйнштейна нет на месте и что номер его домашнего телефона не числится в телефонной книге. Тогда телефонистка сказала, что абонент хочет говорить со мной. Директор вашингтонского бюро агентства «Associated Press» сообщил мне, что во вторник утром все газеты будут писать о деле Оппенгеймера. Ему не терпелось получить заявление Эйнштейна по этому поводу. Я понимал, что шума на Мерсер-стрит завтра утром удастся избежать, только если сразу же сделать краткое заявление, и потому пообещал переговорить с Эйнштейном и в любом случае связаться после этого с Вашингтоном. Я приехал на Мерсер-стрит и позвонил в дверь. Открыла мне секретарь Эйнштейна Элен Дюкас. Извинившись за столь поздний вторжение, я объяснил, что хотел бы наскоро переговорить с профессором.

Б 390/2

В этот момент на верхних ступеньках появился Эйнштейн в купальном халате, спросил, что случилось, и спустился вниз вместе с падчерицей Марго. Я объяснил ему причину своего прихода, и Эйнштейн громко рассмеялся. Меня это несколько обескуражило, и я спросил, что тут смешного. Он ответил, что проблема решается просто. Все, что нужно сделать Оппенгеймеру,— это поехать в Вашингтон, сказать чиновникам, что они идиоты, и вернуться домой. После непродолжительного обсуждения мы решили, что сделать короткое заявление все же придется. Мы написали текст, и Эйнштейн зачитал его по телефону директору вашингтонского бюро агентства «Associated Press». На следующий день Элен Дюкас, которая готовила обед, вдруг заметила, что к дому со всех сторон съехались машины и репортеры расчехляют фотоаппараты. «Не снимая фартука,— рассказывала она мне,— я выскочила из дома, чтобы предупредить Эйнштейна, который вот-вот должен был вернуться. Придя домой, он заявил, что разговаривать с репортерами не будет».

Была ли верной первая реакция Эйнштейна? Разумеется, да, хотя его предложению не нужно, даже нельзя было следовать. Бертран де Жувенель [4]) на одном из своих семинаров выделил характерную особенность политических проблем: решить их можно, только пойдя на компромисс. Ничто не было более чуждо Эйнштейну и в личной жизни и в науке, чем урегулирование разногласий путем компромисса. Он часто говорил о политических проблемах и всегда стремился найти их решение. Такие его заявления нередко называли наивными [5]). По-моему, Эйнштейн отнюдь не был наивным, напротив, он хорошо понимал природу человеческих бед и слабостей, но его заявления по политическим вопросам не всегда предполагали принятие немедленных практических мер, и я думаю, что в целом они не оказывали такого уж большого влияния. Он понимал, что здравомыслящий человек вынужден порой приносить жертвы, и охотно шел на это.

В качестве другого примера, связанного с политикой, я хочу привести историю, рассказанную мне в 1979 г. президентом Израиля Навоном. После кончины в ноябре 1952 г. президента Израиля Вейцмана Бен-Гурион и его кабинет решили предложить пост президента Эйнштейну. Передать это приглашение из Вашингтона было поручено Аббе Эбану (гл. 27). Вскоре после этого в частной беседе Бен-Гурион спросил у Навона (который тогда был его личным секретарем): «Ну и что же мы будем делать, если он согласится?».

Эйнштейн часто ставил свою подпись под пацифистскими заявлениями; впервые он сделал это в 1914 г. (§ 14.1). В 1916 г.

---

[4]) Крупный французский экономист и футуролог.— *Примеч. пер.*

[5]) По словам Оппенгеймера, «в нем всегда была какая-то волшебная чистота, одновременно и детская и безгранично упрямая» [01]. Это высказывание свидетельствует о своеобразном таланте Оппенгеймера понимать людей.

он дал интервью берлинской газете «Die Vossische Zeitung» по поводу работы о Махе его друга пацифиста Фридриха Адлера, который в то время находился в тюрьме за убийство премьер-министра Австрии Карла Штюргка [E1]. После смерти физика Лео Ароиса, которого он не знал лично, но чьим политическим мужеством восхищался, Эйнштейн поместил некролог в газете «Sozialistische Monatshefte» [E2]. После убийства в 1922 г. Вальтера Ратенау, министра иностранных дел Веймарской республики, физика по образованию, Эйнштейн, который был с ним знаком, писал в «Neue Rundschau»: «Живя в башне из слоновой кости, нетрудно быть идеалистом. Он же был идеалистом, хотя и жил на земле, запах которой был ему знаком лучше, чем кому-либо иному» [E3]. В 1923 г. Эйнштейн стал одним из основателей общества «Друзей новой России». Вместе с Лоренцем, Марией Кюри, Анри Бергсоном и другими он некоторое время работал в Комитете Лиги Наций по интеллектуальному сотрудничеству (§ 16.4). Среди лиц, предложенных или одобренных им для представления к присуждению Нобелевской премии мира (гл. 30), были Масарик; Герберт Рансм Браун, почетный секретарь Интернационала противников войны; Карл фон Осецкий, находившийся в то время в немецком концлагере. Эйнштейн часто говорил о судьбе евреев и помогал им. Он подписал массу приглашений на выезд евреев в Соединенные Штаты.

Пацифизм и наднационализм были двумя основными политическими идеалами Эйнштейна. В 20-е годы он поддержал идею всеобщего разоружения и «Единой Европы» (§ 16.4). После второй мировой войны упорно отстаивал концепцию мирового правительства и мирного — только мирного — использования атомной энергии (гл. 27). Эйнштейн прекрасно понимал, что пацифизм и идеи о разоружении были совершенно неуместны в период с 1933 по 1945 г., и глубоко об этом сожалел (§ 25.2). В 1939 г. он послал президенту Рузвельту глубоко продуманное письмо о возможном военном применении деления ядра. В 1943 г. подписал контракт с Бюро артиллерии ВМФ США в качестве временного консультанта (с оплатой 25 дол. в день)[6]). Возможно, результаты его деятельности того времени лучше всего отражает фраза: «Я служу во флоте, но меня не заставили подстричься под бокс» [B1]. Немцев он так и не простил (гл. 27)[7]).

Политическая ориентация Эйнштейна, которую для простоты можно назвать левой, была следствием его стремления к справедливости, а не приверженности какому-либо методу или философской доктрине. «В Ленине я цепю человека, который отдал все силы и пожертвовал собой ради достижения социальной справедливости. Я, однако, не согласен с использовавшимся им

---

[6]) Сведения о консультантской деятельности Эйнштейна, приведенные в [G1, с. 148], неточны.

[7]) Его двоюродная сестра Лина Эйнштейн умерла в Освенциме. Другая его сестра, Берта Дрейфус, погибла в Терезиенштадте.

методом»,— писал он в 1929 г. [E4]. Много документов, посвященных Эйнштейну и политике, приводится к книге «Эйнштейн о мире» [N1].

Эйнштейн был почитателем мудрости, но был ли он философом [8])? Ответ на этот вопрос зависит как от фактов, так и от вкуса. Я бы сказал, что нет, хотя если кто-нибудь будет настаивать на противоположном, я не стану особо возражать. Но то, что интерес Эйнштейна к философии был неподдельным, так же несомненно, как и то, что сам он себя философом не считал.

Он изучал философские труды на протяжении всей жизни, начиная со средней школы, когда впервые прочел Канта (гл. 3). В 1943 г. Эйнштейн, Гёдель, Бертран Рассел и Паули раз пять собирались у Эйнштейна дома для обсуждения философских проблем науки [R1]. «Наука без теории познания (насколько это вообще мыслимо) становится примитивной и путаной»,— писал Эйнштейн через несколько лет, тут же предупреждая о том, что ученому не следует чересчур строго придерживаться какой-то одной теории познания.

«В глазах последовательно мыслящего философа он (ученый) предстает как оппортунист, бросающийся из одной крайности в другую. Как человек, который пытается описать мир, не зависящий от актов восприятия, он представляется *реалистом*. Как человек, считающий понятия и теории свободными (не выводимыми логическим путем из эмпирических данных) творениями человеческого разума, он кажется *идеалистом*. Как человек, считающий свои понятия и теории обоснованными *лишь* в той степени, в которой они позволяют логически интерпретировать соотношения между чувственными восприятиями, он является *позитивистом*. Он может показаться точно так же и *платонистом*, и *пифагорейцем*, ибо он считает логическую простоту непреложным и эффективным средством своих исследований» [E5].

В мышлении Эйнштейна довольно ясно различимы элементы всех этих «измов». Однако в последние 30 лет жизни он перестал быть «оппортунистом, бросающимся из одной крайности в другую», и на свою беду стал философствовать, сковав себя реализмом или, как он предпочитал говорить, объективной реальностью. Этот этап эволюции взглядов Эйнштейна подробно прослеживается в гл. 25. То, что философия расширила его кругозор, так же несомненно, как и то, что философские познания не оказали прямого влияния на его творчество. Высказывания Эйнштейна по философским вопросам, кроме его суждений о Ньютоне, приведены в § 16.5.

К числу людей, которых Эйнштейн в разное время называл своими предшественниками, принадлежат Ньютон, Максвелл, Мах, Планк и Лоренц. Он неоднократно говорил мне, что без

---

[8]) Буквально слово «философ» означает по-гречески «почитатель мудрости».— *Примеч. пер.*

Лоренца не смог бы создать специальную теорию относительности. О его почтительном отношении к Планку говорится в § 18.1; о влиянии Маха [9]) — в § 15.5; о взглядах на работы Максвелла — в § 16.5. Теперь же, после небольшого отступления, я перейду к Ньютону.

Любые посягательства на независимость его мышления с детства вызывали у Эйнштейна бурный эмоциональный протест, что проявилось и в его на редкость обособленной личной жизни. Но он вовсе не был нелюдимым отшельником, обделенным привязанностями. Он был способен на сильные чувства, в том числе и гнев,— об этом свидетельствует его позиция по отношению к Германии как в нацистский период, так и после него. Говоря о справедливости и свободе для других людей, называя евреев братьями, скорбя о судьбе героев варшавского гетто, Эйнштейн выступал как человек чувствующий в не меньшей степени, чем человек мыслящий. Не так уж удивительно и то, что после таких выступлений он всегда искал спасения в ясности и надежности научных идей. Особенно примечательно то, что он обладал даром возвращаться в мир обыденного без какого-либо эмоционального усилия. Ему не нужно было отгораживаться от повседневности. Он просто, когда хотел, отрешался от нее. Неудивительно поэтому, что (как он написал незадолго до смерти) Эйнштейн потерпел два бесславных поражения в браке и за всю жизнь так и не нашел единомышленников, за исключением, быть может, Ньютона.

Когда в середине жизни Эйнштейн писал «о тех замечательных событиях», в которых великий Ньютон участвовал в дни своей молодости, о том, что «природа для него была открытой книгой», что в «одном лице он сочетал экспериментатора, теоретика, мастера и, в не меньшей степени, художника слова», что «он предстал перед нами сильным, уверенным и одиноким», что «радость созидания и ювелирная точность проявляются в каждом его слове и в каждом рисунке» [E7], мне кажется, что он говорил о своих идеалах, о стремлении к самовыражению как в теории, так и в эксперименте (в этом отношении он, конечно, не сравнялся с Ньютоном). Раньше он писал, что достижения Ньютона заслуживают «глубокого уважения» и что понимание Ньютоном слабостей своих теорий всегда вызывало в нем «чувство почтительного удивления» [E8] (одной из этих слабостей является принцип дальнодействия, который, как указывал Ньютон, не должен считаться окончательным объяснением).

---

[9]) Я не совсем разделяю точку зрения И. Берлина [B2, с. 145, 150], будто бы Мах был в числе философских менторов Эйнштейна и будто бы тот сначала принял, а затем отверг феноменализм Маха. Искреннее восхищение Эйнштейна Махом являлось следствием прочтения его труда по механике, в котором руководящим принципом был принцип относительности любого движения. В то же время Эйнштейн считал Маха «жалким философом» [E6], поскольку Мах так и не признал реальность существования атомов.

«Счастливый Ньютон, счастливое детство науки!» [E7]. Когда Эйнштейн поместил эти слова в начале введения к ньютоновой «Оптике», он, несомненно, имел в виду, что знаменитая фраза Ньютона *hypotheses non fingo* («гипотез не измышляю») была отражением научного стиля прошлого. В другой работе Эйнштейн еще яснее высказался по этому поводу: «В настоящее время известно, что наука не может вырасти на основе одного только опыта и что при построении науки мы вынуждены прибегать к свободно создаваемым понятиям, пригодность которых можно a posteriori проверить опытным путем. Эти обстоятельства ускользали от предыдущих поколений, которым казалось, что теорию можно построить чисто индуктивно, не прибегая к свободному творческому созданию понятий. Чем примитивнее состояние науки, тем легче исследователю сохранять иллюзию по поводу того, что он будто бы является эмпириком. Еще в XIX в. многие верили, что ньютоновский принцип — *hypotheses non fingo* — должен служить фундаментом всякой здравой естественной науки» [E9].

Приведу еще одно высказывание Эйнштейна о развитии научного метода. Так написать мог только он: «Прости меня, Ньютон; ты нашел единственный путь, возможный в твое время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта» [E5, с. 31].

Был, однако, один вопрос, при рассмотрении которого Эйнштейн всегда принимал сторону Ньютона и ссылался на его авторитет,— о причинности. По случаю 200-летия со дня смерти Ньютона Эйнштейн писал секретарю Королевского общества: «Все, кто принимает скромное участие в размышлениях над тайнами физических явлений, мысленно находятся в эту минуту вместе с вами и объединены теми восхищением и любовью, которые связывают нас с Ньютоном». Затем он проследил развитие физики после Ньютона и заключил так: «Только в квантовой механике дифференциальный метод Ньютона перестал соответствовать действительности, и строгая причинность покинула нас. Но последнее слово в этой области еще не сказано. Пусть же дух ньютоновского метода даст нам силу для восстановления согласия между физической реальностью и наиболее глубокой чертой учения Ньютона — строгой причинностью» [E10].

Что же такое строгая ньютонова причинность? Поясню на примере. Если точно задать положение и скорость некой частицы в данный момент и знать все действующие на нее силы, то по законам Ньютона можно рассчитать точное положение и скорость этой частицы в любой последующий момент. Из квантовой же теории следует, что невозможно дать информацию о поло-

жении и скорости с идеальной точностью, даже если в распоряжении исследователя имеются самые точные приборы. Именно эту проблему мы с Эйнштейном и обсуждали во время разговора о Луне, теле столь массивном, что ограничения, накладываемые на точность информации о ее положении и скорости, незначительны, и для любых астрономических целей можно пренебречь неопределенностью имеющейся информации и продолжать говорить об орбите Луны.

С атомами все не так. В атоме водорода электрон не движется по орбите в том же смысле, в котором Луна движется вокруг Земли, поскольку если бы дело обстояло так, то атом водорода был бы плоским, как блин, хотя на самом деле он скорее похож на маленький шарик. Возврат к ньютоновой причинности принципиально невозможен, что, разумеется, ни в коей мере не умаляет достижений Ньютона. Надежды Эйнштейна на возврат к доброй старой причинности — неосуществимая мечта. Конечно, эта разделяемая современными физиками точка зрения не мешала им признавать в Эйнштейне крупнейшую научную фигуру нашего века. Его специальная теория относительности есть завершение работ Максвелла и Лоренца. Его общая теория относительности завершает ньютонову теорию тяготения и отражает идеи Маха об относительности любого движения. Труды Эйнштейна венчают работы его предшественников, в них он дополняет и пересматривает основы их теорий. В этом смысле он — фигура переходная, человек, совершенствующий прошлое и изменяющий будущее. Но в то же время он и пионер, поскольку сначала Планк, затем он, а потом и Бор заложили основы совершенно новой области физики — квантовой теории.

Эйнштейн заслуживает того же комплимента, которым он удостоил Ньютона,— он был «художником слова». Его талант владения немецким языком уступал лишь дару ученого. Я имею в виду не только умение сочинять забавные стишки, но и высокое качество его прозы. Он был большим мастером нюансов, которые очень трудно передать при переводе. Изучающий труды Эйнштейна должен читать их по-немецки. Правильно, что некоторые крупные статьи, например содержащая его научное кредо и напечатанная в «Journal of the Franklin Institute» в 1936 г., автобиографический очерк в книге Шилппа [E5], были напечатаны на немецком языке и рядом в переводе на английский. Все научные труды Эйнштейн писал по-немецки, вне зависимости от того, на каком языке они выходили впоследствии. В статьях, посвященных памяти его коллег и друзей, отмечаешь не только прекрасный стиль, но и глубокое знание людей. А писал он о Шварцшильде и Смолуховском, Марии Кюри и Эмми Нётер, Майкельсоне и Томасе Эдисоне, о Лоренце, Перрене, Ланжевене, Планке, Вальтере Ратенау и, трогательнее всего, о Пауле Эренфесте. Эти портретные наброски служат наилучшим опровержением мнения о том, будто бы Эйнштейн был наивным человеком.

В других языках, помимо немецкого, он чувствовал себя менее уверенно [10]). Во время первого приезда в Париж в 1922 г. он читал лекции по-французски [K1]. Однако выступая перед аудиторией во время своих первых поездок в Англию и Соединенные Штаты, он говорил по-немецки, хотя позднее неплохо овладел английским языком.

Любовью его была музыка. Эйнштейн был равнодушен к композиторам XX в. и многим композиторам XIX в. Любил Шуберта, но его мало привлекали тяжелые драматические произведения Бетховена. Он не был в восторге от Брамса, недолюбливал Вагнера, предпочитал композиторов более раннего времени — Моцарта, Баха, Вивальди, Корелли, Скарлатти. Я никогда не слышал его игры на скрипке, но мне рассказывали о его музыкальности и той легкости, с которыми он читал с листа. О его предпочтениях в изобразительном искусстве лучше всего говорит письмо Марго Эйнштейн Мейеру Шапиро: «В живописи он предпочитал, конечно, старых мастеров. Они казались ему более „убедительными“ (его выражение), чем художники нашего времени. Но иногда он удивлял меня интересом к *раннему* периоду Пикассо (1905, 1906)... Такие слова, как *кубизм*, *абстрактная живопись*, для него ничего не значили... Его глубоко волновали Джотто, а также Фра Анжелико... Пьеро делла Франческа... Он любил маленькие итальянские города... Флоренцию, Сиену (сиенскую живопись), Пизу, Болонью, Падую, восхищался их архитектурой... Его всегда восхищал и глубоко трогал Рембрандт» [E11].

В качестве заключения к этому вводному очерку об Эйнштейне как личности [11]) я хотел бы повторить то, что уже было сказано в предисловии: я никогда не встречал человека свободнее его. Я имею в виду, что, в отличие от других, он был хозяином своей судьбы в полном смысле этого слова. Если он и верил в бога, то это был «бог» Спинозы. Эйнштейн не был ниспровергателем. Им никогда не руководило стремление свергнуть авторитеты. Не был он и бунтарем, ибо любая власть, кроме власти разума, представлялась ему слишком нелепой, чтобы тратить силы на борьбу с ней (вряд ли можно назвать воинственной его оппозицию нацизму).

Внутренняя свобода позволяла Эйнштейну ставить научные вопросы, а его гений — отбирать из них наиболее корректные; потом ему ничего не оставалось, как принять единственно возможный ответ. Сознание своего предназначения позволило ему

---

[10]) В 20-е годы Эйнштейн однажды сказал: «Я не люблю ни новую одежду, ни новую еду. И мне не хотелось бы учить новые языки» [S1].

[11]) Я не имею четкого представления о литературных вкусах Эйнштейна и не знаю, насколько полным или представительным является приводимый ниже перечень некоторых из любимых им авторов: Гейне, Анатоль Франс, Бальзак, Ф. М. Достоевский («Братья Карамазовы»), Музиль, Диккенс, Лагерлёф, Л. Н. Толстой, Казандзакис, Брехт («Галилей»), Брох («Смерть Вергилия»), Ганди («Автобиография»), М. Горький, Хёрси («Колокол по Адано»), ван Лоон («Жизнь и эпоха Рембрандта»), Рейк («Слушая третьим ухом»).

продвинуться дальше других, а вера в себя не дала свернуть с избранного пути. Если сознание собственной славы и льстило ему, то лишь на мгновенье. Он не страшился бега времени и был до странности равнодушен к смерти. Я не вижу трагедии ни в его более позднем отношении к квантовой теории, ни в неудачных попытках создания единой теории поля, в особенности потому, что некоторые из поставленных им проблем по сей день стимулируют развитие науки (§ 2.2). Кроме того, я ни разу не заметил ничего трагического в его лице. Иногда он грустил, но чувство юмора в конце концов побеждало.

Пройдем с экскурсией по научной части биографии Эйнштейна.

Эйнштейн никогда не испытывал особой любви к преподаванию. Тем не менее, ему доставляло удовольствие обсуждать физические проблемы и с коллегами своего возраста, и с людьми намного моложе, хотя никто так и не защитил диссертации под его руководством. Все основные труды написаны им в одиночку, но нередко у него бывали и соавторы. Обзор этих совместных работ, выполненных в сотрудничестве с более чем 30 коллегами и помощниками, приводится в гл. 28. Со студенческих дней лет до сорока он искал возможностей проводить эксперименты. Будучи студентом, надеялся обнаружить эфир, через который (как он тогда считал) движется Земля (§ 6.4). Работая в патентном бюро, он между делом проектировал прибор для измерения малых напряжений (гл. 3, 28). В Берлине проводил эксперимент по вращению, вызываемому намагничиванием (§ 14.2), измерял диаметр капилляров мембран (гл. 28) и занимался патентами на холодильные устройства и слуховой аппарат (гл. 28). Но, конечно, его основным призванием была теоретическая физика.

Начать краткий обзор его теоретических работ лучше всего на примере сделанного Эйнштейном в 1905 г. В том году он опубликовал шесть статей:

1. О световых квантах и фотоэлектрическом эффекте; закончена 17 марта (§ 19.3, 19.5). Эта статья, которая впоследствии принесла ему Нобелевскую премию по физике, была написана раньше докторской диссертации.

2. О новом методе определения размеров молекул; закончена 30 апреля. Это была его докторская диссертация — работа, которую в современной литературе цитируют чаще всего (§ 5.3).

3. О броуновском движении; получена редакцией журнала «Annalen der Physik» 11 мая. Прямое развитие его диссертационной работы (§ 5.4).

4. Первая статья по СТО; получена тем же журналом 30 июня.

5. Вторая статья по СТО, содержащая соотношение $E = mc^2$, получена тем же журналом 27 сентября.

6. Вторая статья о броуновском движении; получена тем же журналом 19 декабря.

Ранее опубликованные работы не предвещали такого небывалого взрыва творческой активности. По собственному признанию Эйнштейна, две первые статьи (1901 и 1904 гг.), касающиеся гипотезы об универсальном законе для межмолекулярных сил, не имели никакой ценности (§ 4.1). За этим последовали три статьи среднего качества об основах статистической механики (§ 4.3, 4.4). Последняя из них, написанная в 1904 г., содержит первое упоминание о квантовой теории. Ни одна из этих первых пяти статей не оставила большого следа в физике, но я думаю, что для Эйнштейна они были очень важны и послужили своеобразной творческой разминкой. Затем последовал год молчания, а потом — в 1905 г.— лавина работ. Не знаю, каков был ход его мыслей в 1904 г. Его личная жизнь изменилась в двух отношениях — работа в патентном бюро превратилась из временной в постоянную и родился первый сын. Способствовали ли эти события проявлению гения Эйнштейна, сказать не могу, но думаю, что рождение сына могло оказать на него сильное влияние. Не могу дать также общего и полного определения понятия «гений», за исключением того, что это более чем крайняя форма проявления таланта и что критерии гениальности не объективны. С облегчением отмечаю, что признать гением Эйнштейна, видимо, гораздо легче, чем Пикассо, не говоря уж о Вуди Аллене [12]). Вследствие этого торжественно провозглашаю (это мое личное мнение): «Эйнштейн был гением!».

Работы, написанные Эйнштейном до 1905 г., а также статьи, перечисленные выше под номерами 2, 3 и 6, явились результатом его интереса к двум центральным проблемам начала XX в. Этот вопрос рассмотрен в ч. II.

Первая проблема — реальность существования молекул. Как доказать (или опровергнуть), что атомы и молекулы — не вымысел? Если они действительно существуют, то как определить их размер и сосчитать их? В § 5.3 содержится предварительный обзор положения дел в этой области в XIX в. В то время представитель наиболее молодой науки — химии — рассматривал этот вопрос в одном контексте, физик — в другом, и каждый из них мало считался с тем, что делалось в соседней области. В 1900 г. многие, хотя и не все, ведущие химики и физики поверили в реальность молекул. Некоторые из них уже знали, что атом не оправдывает своего названия «неделимый». Лет через десять вопрос о существовании молекул был решен однозначно благодаря тому, что в предыдущие годы различные методы расчета числа этих гипотетических частиц давали с небольшим разбросом один и тот же результат. Само разнообразие методов и близость получаемых результатов придавали молекулярной теории притягательность объединяющего принципа. Три таких метода предложены в работах Эйнштейна 1905 г. В марте он привел

---

[12]) Современный американский писатель-юморист, актер и постановщик кинокомедий.— *Примеч. пер.*

подсчет молекул в статье, посвященной световым квантам (§ 19.3). В апреле он проводил расчет с помощью характеристик водного раствора сахара (§ 5.3). В мае дал третий метод расчета и объяснил давно известное явление броуновского движения взвеси мелких частиц (§ 5.4). Появление всех этих методов было следствием важных достижений экспериментальной физики конца XIX в. Метод, предложенный в марте, мог быть разработан лишь благодаря последним результатам, достигнутым в спектроскопии дальней области инфракрасного излучения (§ 19.1). Методы, предложенные в апреле и мае, явились следствием открытия доктором Пфеффером метода изготовления полупроницаемых мембран (§ 5.2). Более поздняя работа Эйнштейна (1911) о голубом цвете неба и критической опалесценции содержит другие методы подсчета числа молекул (§ 5.5).

Вторая проблема — молекулярные основы статистической физики. Если атомы и молекулы действительно существуют, то каким образом можно выразить такие макроскопические понятия, как давление, температура и энтропия, через движение этих субмикроскопических частиц? Великие умы XIX в.— Максвелл, Больцман, Кельвин, Ван-дер-Ваальс и другие, конечно, не сидели сложа руки и не ждали подтверждения молекулярной гипотезы, прежде чем заняться проблемой номер два. Наиболее трудной из всех задач был вывод второго закона термодинамики. Какими молекулярными процессами объясняется то, что энтропия изолированной системы стремится к максимуму при ее переходе в состояние равновесия? Обзор работ, выполненных по этой проблеме Эйнштейном и его предшественниками, приведен в гл. 4. В те далекие дни не только Эйнштейн недооценивал глубины математического подхода, которой заслуживала эта сложная проблема. Когда Эйнштейн писал свою работу, его знания о фундаментальном труде Больцмана были весьма фрагментарны; о работах Гиббса он не знал вообще. Все это отнюдь не облегчает оценку его собственного вклада в решение этой задачи.

Вторая проблема представляла для Эйнштейна больший интерес, чем первая. Позже он говорил, что броуновское движение не только давало метод определения числа частиц, но и, что еще важнее, позволяло при помощи микроскопа увидеть то движение, которое мы называем теплотой. В целом работа Эйнштейна о втором законе термодинамики имела меньшую ценность, чем его исследования, посвященные проверке молекулярной гипотезы. В 1911 г. он писал, что, возможно, не опубликовал бы свои статьи 1903 и 1904 гг., если бы был знаком с работами Гиббса.

Тем не менее, интерес Эйнштейна к фундаментальным вопросам статистической механики был исключительно животворным, ибо позволил ему сделать наиболее важный вклад в разработку квантовой теории. Не случайно термин *принцип Больцмана*, пущенный в ход Эйнштейном, впервые появился в его мартовской статье 1905 г. о световых квантах. По сути дела и сам постулат о существовании световых квантов развился из статистического

подхода к характеристикам равновесного излучения (§ 19.3). Следует также помнить, что основные положения его первой работы (1904) о флуктуациях энергии (§ 4.4) относятся к квантовой области. Анализ этих флуктуаций применительно к излучению черного тела заставил его первым, задолго до построения квантовой механики, заявить в 1909 г., что будущая теория должна основываться на дуалистическом описании с использованием как частиц, так и волн (§ 21.1). Другое звено связи между статистической механикой и квантовой теорией было выковано в его исследовании о броуновском движении молекул в потоке электромагнитного излучения. Оно привело к введению понятия импульса световых квантов (§ 21.3). Предложенный им в 1916 г. новый вывод закона Планка (закона излучения черного тела) также имеет статистическую основу (§ 21.2). В этой работе он указал на отсутствие ньютоновой причинности в процессе, носящем название самопроизвольного излучения. С того времени его и начала беспокоить проблема причинности (§ 21.4).

Активная работа Эйнштейна в области статистической физики началась в 1902 г. и продолжалась до 1925 г., когда он сделал последний большой вклад в физику — предложил новый подход к квантовой статистике молекул (гл. 23). Вновь, и в последний раз, он использовал флуктуации с таким мастерством, что вышел на самый рубеж волновой механики (§ 24.2). Взаимосвязи между работами Эйнштейна, де Бройля и Шрёдингера, обсуждаемые в гл. 24, ясно показывают, что корнями волновая механика уходит в статистическую механику, в отличие от матричной механики, где связь между работами Бора, Гейзенберга и Дирака обусловлена прежде всего исследованиями динамики атомов (§ 18.3).

Долгие периоды раздумий очень характерны для научной деятельности Эйнштейна. Размышления над проблемами квантов не давали ему покоя с конца 1900 г., с момента открытия Планком закона излучения черного тела, но принесли первые плоды лишь в марте 1905 г. Вопросы, которые затем легли в основу СТО, тяготили его еще с 1895 г. (§ 6.4). Эта теория увидела свет в июне 1905 г. Об ОТО он впервые начал думать в 1907 г. (гл. 9). В первом приближении она была завершена в ноябре 1915 г. (§ 14.3). Интерес Эйнштейна к единой теории поля возник еще в 1918 г. (§ 17.1). Первое предложение по теории такого рода он сделал в 1925 г. (§ 17.4). В случае СТО и ОТО эти периоды раздумий привели к бурной развязке. Поняв, как правильно толковать одновременность, Эйнштейн уже через пять недель закончил первую статью о СТО (§ 7.1). Позднее, после нескольких лет проб и ошибок, он окончательно сформулировал ОТО примерно за два месяца (§ 14.3).

Затем я останавливаюсь на СТО. Историю ее создания можно изложить очень кратко: в июне 1905 г. Эйнштейн опубликовал статью об электродинамике движущихся тел. Она состоит из десяти разделов. В законченном виде теория излагается в первых

пяти разделах, остальные содержат справедливое по сей день описание приложений принципов, приведенных в первых пяти.

Я же рассказываю эту историю несколько подробнее. Начинаю с коротких замечаний о понятии эфира в XIX в. (§ 6.1), этой эфемерной гипотетической среды, которая была ранее введена для объяснения процесса распространения световых волн и упразднена Эйнштейном. Часто задается вопрос: есть ли связь между решением Эйнштейна отказаться от эфира и результатом эксперимента Майкельсона — Морли, с высокой степенью точности продемонстрировавшего отсутствие предполагавшегося эфирного ветра, который должен был возникать при движении Земли в пространстве (§ 6.1)? В ответ можно сказать, что Эйнштейн, несомненно, знал о результате, полученном Майкельсоном и Морли (§ 6.4), но, вероятно, он оказал лишь косвенное влияние на процесс его мышления (§ 7.1). Начиная с 1907 г., Эйнштейн часто подчеркивал фундаментальную важность работы Майкельсона и Морли, но, что весьма примечательно, был уклончив в оценке прямого влияния этого опыта на его собственную работу. Толкование такой позиции лежит за гранью исторического исследования, но в гл. 8 я рискну порассуждать и на эту тему.

В истории создания СТО рядом с именем Эйнштейна стоят имена двух выдающихся личностей — Лоренца и Пуанкаре. Лоренц — творец теории электронов, соавтор лоренцева сокращения (этот термин ввел Пуанкаре), толкователь эффекта Зеемана, ученый, которого Эйнштейн признал своим предшественником,— вывел преобразования Лоренца (названные так Пуанкаре) в 1904 г. Эйнштейн, знакомый в то время лишь с трудами Лоренца, написанными до 1895 г., заново получил эти преобразования в 1905 г. В 1898 г. Пуанкаре, один из величайших математиков своего времени и выдающийся специалист в области математической физики, указал, что нельзя непосредственно ощущать одновременность двух событий, происходящих в двух различных местах. Это замечание было почти наверняка известно Эйнштейну до 1905 г. (§ 6.2). В 1905 г. Эйнштейн и Пуанкаре независимо и почти одновременно (с интервалом в несколько недель) установили групповые свойства преобразований Лоренца и сформулировали теорему сложения скоростей. Тем не менее, ни Лоренцу, ни Пуанкаре не удалось создать СТО, они слишком глубоко увязли в динамических соображениях. Лишь Эйнштейн разглядел критически важный новый момент: от динамической теории эфира необходимо отказаться в пользу новой кинематики, основанной на двух новых постулатах (гл. 7). Лишь он увидел, что преобразования Лоренца и, следовательно, сокращение Лоренца — Фицджеральда могут быть выведены из кинематических соображений. Лоренц признал это и позднее довольно неплохо разбирался в СТО, но даже после 1905 г. не отказался полностью ни от эфира, ни от своих оговорок относительно существования предельного значения скорости света (гл. 8). Пуанкаре же за

всю свою жизнь (умер он в 1912 г.) так и не понял основ СТО (гл. 8).

СТО внесла ясность в старую физику и создала новую; в частности, в ней содержится предложенный в 1905 г. Эйнштейном вывод соотношения $E = mc^2$ (§ 7.2). Лишь через несколько лет было получено первое надежное экспериментальное подтверждение новой теории — наличие связи между массой, энергией и скоростью для быстрых электронов (§ 7.2). После 1905 г. Эйнштейн лишь изредка обращался к другим приложениям теории (§ 7.4), главным образом из-за того, что после 1907 г. он начал работать с дальним прицелом — я имею в виду создание ОТО.

История создания этой теории более запутанна. Тернистой была дорога к ней. Никакое упрощение не позволяет описать эту историю так же кратко, как СТО. На путь создания квантовой теории раньше Эйнштейна вступил Планк. При работе над СОТ Эйнштейна вдохновлял Лоренц. К ОТО он начал идти в одиночку. Продвижение по этому пути уже не отмечено теми изяществом и подкупающей простотой, которые характерны для всех его работ, опубликованных в 1905 г. Первые шаги были сделаны в 1907 г. с открытием упрощенного варианта принципа эквивалентности, а также с осознанием того, что вещество вызывает искривление лучей света и что линии солнечного спектра должны быть слегка сдвинуты в красную область по сравнению с теми же спектральными линиями, наблюдаемыми на Земле (гл. 9). В последующие три с половиной года внимание Эйнштейна было обращено к «кризисной» области — квантовой теории, а не к менее актуальным проблемам ОТО (гл. 10). Всерьез Эйнштейн вновь занялся ОТО после переезда в Прагу в 1911 г. Он многому научился во время работы над первоначальным вариантом теории, в частности рассчитал искривление лучей света при прохождении их вблизи Солнца. Этот результат был неверен, так как в то время он еще считал, что пространство является плоским (гл. 11). Летом 1912 г., вернувшись в Цюрих, Эйнштейн делает фундаментальное открытие — пространство не плоское, геометрия мира — не евклидова, а римановa. При квалифицированной помощи старого друга, математика Марселя Гроссмана, Эйнштейн устанавливает первые связи между геометрией и тяготением. Со свойственным ему оптимизмом он считает, что наконец решил не поддававшуюся в течение 50 лет задачу — создал теорию гравитационного поля (гл. 13). Лишь к концу 1915 г. он полностью осознал, сколь несовершенной была его теория. В это же время пишет свои основные труды о тяготении и Гильберт (§ 14.4) После нескольких месяцев исключительно напряженной работы, 25 ноября 1915 г. Эйнштейн представляет окончательный вариант своей пересмотренной теории (§ 14.3).

За неделю до этого он получил два выдающихся результата. Эйнштейн добился того, к чему стремился с 1907 г.,— объяснил давно известное явление прецессии перигелия Меркурия. Это

стало кульминационным моментом его жизни. Он был так взволнован, что в течение трех дней не мог работать. Кроме того, он обнаружил, что полученное им ранее искривление света вдвое меньше правильного. В 1919 г., когда и второй результат получил экспериментальное подтверждение, Эйнштейн был «канонизирован» (§ 16.2).

После 1915 г. Эйнштейн продолжал работать над проблемами ОТО. Он первым предложил теорию гравитационных волн (§ 15.4), явился основателем релятивистской космологии, современной теории строения Вселенной в целом (§ 15.1). То, что Вселенная расширяется, было обнаружено Хабблом при жизни Эйнштейна. Радиогалактики, квазары, нейтронные звезды и гипотетические черные дыры были открыты уже после его смерти. Достижениями наблюдательной астрономии в постэйнштейновский период мы в значительной степени обязаны резко возросшему в последние годы интересу к ОТО. Беглый обзор достижений ОТО с 1915 г. до наших дней приведен в гл. 15.

Но вернемся к началу пути. После 1915 г. деятельность Эйнштейна в области теории относительности все меньше касается приложений ОТО и все больше — обобщений этой теории. В первые годы после создания ОТО такой поиск представлялся вполне оправданным, ведь в ОТО само существование гравитационного поля неразрывно связано с геометрией физического мира. Существование же электромагнитного поля, в то время единственно известного поля помимо гравитационного, не предполагало наличия такого рода связи (§ 17.1). Электромагнетизм не сводится к римановой геометрии. Почему бы тогда не попытаться создать более общую геометрию, в которой электромагнетизм играл бы столь же фундаментальную роль, что и тяготение? Если СТО объединила электричество и магнетизм и если ОТО свела тяготение к геометрии, то почему бы не попробовать объединить и свести к геометрии электромагнетизм и тяготение? Разве не пытался Фарадей, экспериментально объединив электричество и магнетизм, определить, не наводит ли электрический ток и тяготение, сбрасывая из-под потолка на покрытый ковром пол лекционного зала Королевской ассоциации кусочки металла? Разве не писал он: «Если надежда моя не беспочвенна, то как же велика, могуча и возвышенна та неизменная по своему роду сила, которую я постичь пытаюсь, и как же велики будут просторы новых знаний, открываемые человеческому разуму»? И разве не написал он после того, как эксперимент не дал ожидаемого результата: «Это не колеблет моей неизменной уверенности в наличии связи между тяготением и электричеством, хотя опыт и не подтвердил существования такой связи»? [W1, с. 468—469]. Такие же мысли и представления владели Эйнштейном, когда он приступал к программе создания единой теории поля. В цели этой программы не входило ни устранение неясностей, ни разрешение парадоксов. Им руководило стремление к гармонии в чистом виде.

На пути к ОТО Эйнштейна ждала созданная в XIX в. риманова геометрия. В 1915 г. более общие геометрии, на поиски которых вскоре устремятся он и другие ученые, еще не существовали. Их нужно было создать. Следует подчеркнуть, что программа объединения была не единственным стимулом поиска новых геометрий. В 1916 г. математики, признавая стимулирующее влияние ОТО, начали аналогичный поиск, исходя из собственных соображений Так, работа Эйнштейна послужила непосредственной причиной развития новой области математики — теории связностей (§ 17.3).

В 20-е — 30-е годы стало очевидно, что помимо тяготения и электромагнетизма существуют и другие силы. Эйнштейн предпочел их игнорировать, хотя они ничуть не менее фундаментальны, чем те две, которые были известны и раньше. Он попрежнему стремился к объединению тяготения и электромагнетизма, пробуя один путь, заходя в тупик и выбирая новый. Он рассматривал миры, имеющие более четырех привычных пространственно-временных измерений (§ 17.2), или новые геометрии четырехмерного мира (§ 17.4). Но тщетно.

В последние годы поиски путей объединения всех сил стали центральной темой физики (§ 17.5). Используются новые методы, благодаря которым удалось добиться заметного прогресса (§ 2.2). Но мечта Эйнштейна об объединении тяготения с другими силами так до сих пор и не осуществлена.

В заключение я остановлюсь на вкладе Эйнштейна в квантовую теорию. В конце 1906 г. Эйнштейн стал основателем квантовой теории твердого тела, дав верное по сути толкование аномальному поведению при низких температурах некоторых типов твердых тел, таких, как алмаз (гл. 20). Необходимо также более подробно остановиться на сделанном ранее замечании о статистических основах гипотезы световых квантов. В работе, написанной в марте 1905 г., содержится не один, а два постулата.

Первый гласит, что квант света рассматривается как сгусток энергии до тех пор, пока речь идет о свойствах собственно излучения (без взаимодействия с веществом). В качестве второго постулата Эйнштейн сделал предположение — он назвал его эвристическим принципом — о том, что при взаимодействии с веществом, т. е. при испускании и поглощении, свет также возникает или уничтожается в виде аналогичных дискретных сгустков энергии (§ 19.3). Вот в чем, по-моему, заключается поистине революционный вклад Эйнштейна в физику (гл. 2). Он подрывал все сложившиеся представления о взаимодействии света и вещества.

Далее я подробно изложу различные причины широко распространенного недоверия к эвристическому принципу (§ 19.6), сопротивление которому не ослабло и после того, как другие труды Эйнштейна были признаны выдающимися, и даже позднее, когда результаты экспериментов по фотоэлектрическому

эффекту с высокой степенью точности подтвердили справедливость эвристического принципа (§ 19.5).

Световой квант — сгусток энергии с течением времени превратился в фотон — сгусток энергии и импульса (гл. 21), фундаментальную частицу с нулевой массой и равным единице спином. Никогда еще предположение о существовании новой частицы не сталкивалось с бо́льшим сопротивлением, чем в случае фотона (§ 18.2). Никто не противился фотону дольше Бора (гл. 22). Сопротивление прекратилось лишь тогда, когда эксперименты по рассеянию света на электронах (эффект Комптона) доказали правоту Эйнштейна (§ 21.6, гл. 22).

Через несколько месяцев после решения вопроса о фотоне родилась квантовая механика. Подробно о реакции Эйнштейна на это событие рассказано в гл. 25. Первоначально он считал, что квантовая механика внутренне противоречива (§ 25.1), но вскоре отказался от этой мысли. Позднее он пришел к убеждению, что квантовая механика страдает неполнотой (§ 25.3). Тем не менее, Эйнштейн признал, что нерелятивистская квантовая механика — это действительно большое достижение. Выдвижение им кандидатур Шрёдингера и Гейзенберга на присуждение Нобелевской премии является одним из подтверждений такого мнения (гл. 30).

Эйнштейн, однако, ни разу не сказал доброго слова в адрес релятивистского варианта квантовой механики, известного как квантовая теория поля. Успехи этой теории не производили на него никакого впечатления. Однажды, в 1912 г., он сказал, что чем больше достижения квантовой теории, тем бестолковее она выглядит (гл. 20). В последние годы, говоря об успешных физических теориях, он обычно приводил в пример ньютонову теорию тяготения (гл. 26). Разве не господствовала она более двух столетий? И разве не оказалась в конечном счете неполной?

Эйнштейн до конца дней не оставлял попыток создать такую теорию, которая включала бы в себя квантовые явления, но в то же время удовлетворяла его страсть к причинности. Представления Эйнштейна о будущем объединении теории относительности и квантовой теории в рамках единой теории поля изложены в последней научной главе этой книги (гл. 26).

Наконец, позвольте кратко высказать собственное мнение. Ньютонова причинность канула в Лету. Синтез теории относительности и квантовой теории не завершен (гл. 2), поэтому оценку взглядов Эйнштейна никак нельзя считать окончательной.

На этом знакомство с содержанием книги заканчивается. Далее следуют общие соображения о теории относительности и квантовой теории (гл. 2), а затем приведен краткий очерк ранних лет жизни Эйнштейна (гл. 3). После этого речь идет о физике.

Глава 2. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

До последнего вздоха Эйнштейн требовал от нас синтеза.

В. Паули

§ 2.1. Упорядоченные переходы и революционные периоды

Во всей истории физики не было такого неожиданного и всеохватывающего периода сильных потрясений, как десятилетие с 1895 по 1905 г. Последовавшие чередой экспериментальные открытия рентгеновского излучения (1895), эффекта Зеемана (1896), радиоактивности (1896), электрона (1897), а также распространение инфракрасной спектроскопии на область длин волн от 3 до 60 мкм открыли небывалые горизонты. Рождение квантовой теории (1900) и теории относительности (1905) ознаменовало начало новой эры — эры, потребовавшей пересмотра самих основ физической теории. Путь новаторским теоретическим концепциям прокладывали двое: Макс Карл Эрнст Людвиг Планк, профессор Берлинского университета, человек, одержимый поиском универсальной функции частоты и температуры, о существовании которой стало известно в 1859 г. с открытием Густавом Робертом Кирхгофом фундаментального закона излучения черного тела (§ 19.1), и Альберт Эйнштейн, технический эксперт швейцарского патентного бюро, работавший в изоляции, которую так и хочется назвать «блестящей»[1]) (гл. 3).

Они были совершенно не похожи друг на друга ни по воспитанию, ни по условиям жизни, ни по темпераменту, ни по научному стилю. Но было у них и много общего. Выступая на торжествах, посвященных 60-летию Планка, Эйнштейн сказал: «Стремление к изначальной гармонии[2]) было неиссякаемым источником терпения и настойчивости, с которыми Планк отдавался самым простым вопросам, связанным с физической наукой, в то время как он мог бы поддаться искушению и пойти иными путями, которые привели бы к более привлекательным результатам. Я часто слышал, как коллеги Планка связывали его отношение к науке с его необычайными личными дарованиями, его энергией и пунктуальностью. Думаю, что они ошибаются. То состояние ума, которое служит движущей силой в этом случае, напоминает состояние фанатика или влюбленного. Усилия, затрачиваемые в течение длительного периода времени, стимулируются не каким-то составленным заранее планом или целью. Это вдохновение проистекает из душевной потребности» [E1].

Это всепоглощающее стремление к гармонии пронизывало научную жизнь Эйнштейна и Планка. Вот почему они так восхищались друг другом.

---

[1]) «Блестящая изоляция» — доктрина отказа от длительных союзов с другими державами.— *Примеч. пер.*

[2]) Это выражение Лейбница Эйнштейн считал особо удачным.

Основная цель этой главы — вкратце рассказать об отношении Эйнштейна к квантовой теории и теории относительности. Для этого полезно напомнить о том различии, которое он видел в двух типах физических теорий [E2]. Большинство теорий, говорил он, конструктивны, сложные явления в них толкуются при помощи сравнительно простых положений. Примером служит кинетическая теория газов, в которой механические, тепловые и диффузионные характеристики газов сводятся к движению и взаимодействию молекул. «К достоинствам конструктивных теорий относятся их законченность, гибкость и ясность». Помимо них существуют «фундаментальные теории», в которых используется аналитический, а не синтетический метод: «Исходным пунктом и основой этих теорий являются не гипотетические положения, а эмпирически найденные общие свойства явлений». Примером служит утверждение о невозможности создания вечного двигателя в термодинамике. «Достоинством фундаментальных теорий является их логическое совершенство, надежность исходных положений». И далее Эйнштейн заявляет: «Теория относительности принадлежит к классу фундаментальных теорий». Эти строки были написаны в 1919 г., когда теория относительности уже стала походить на «дом с двумя этажами» — СТО и ОТО. (Естественно, СТО также представляет собой фундаментальную теорию.)

Итак, к концу десятилетия 1895—1905 гг. на свет появилась новая фундаментальная теория — специальная теория относительности. А как же в то время обстояло дело с квантовой теорией? Она не была ни фундаментальной, ни конструктивной теорией. По сути дела, она вообще не была теорией. Первые результаты Планка и Эйнштейна по излучению черного тела показали, что с основами классической физики что-то не так, но эти основы не были тут же заменены, как в СТО, новыми (гл. 7). Петер Дебай вспоминал, что после публикации работа Планка обсуждалась в Ахене, где Дебай работал у Зоммерфельда. Закон Планка удовлетворял экспериментальным данным, но, как писал Дебай, они «не знали, являются кванты чем-то фундаментально новым или нет» [B1].

Появление квантовой теории в 1900 г. (§ 19.1) и СТО в 1905 г. (гл. 7) объединяет то, что ни одна из них не была встречена ликованием прессы, народными гуляниями или провозглашением наступления новой эры. На этом сходство заканчивается. СТО была принята сравнительно быстро и гладко. Однако даже такие великие умы, как Хендрик Антон Лоренц и Анри Пуанкаре, с трудом осознавали, что это скорее новая фундаментальная кинематическая, нежели конструктивная динамическая теория (гл. 8). Правда и то, что эта теория вызвала неизбежное замешательство в философских кругах, о чем свидетельствует, например, книга Анри Бергсона, написанная ни много ни мало в 1922 г. [B2]. Тем не менее, люди старшего поколения и с ними Планк, а также новое племя молодых теоретиков с готовностью

признавали, что СТО полностью определяется двумя принципами, изложенными Эйнштейном в его статье 1905 г. (§ 7.1). Все остальное было приложением этих теоретических принципов. СТО сразу появилась «в готовом виде». «Старой» теории относительности просто никогда не было.

«Старая» же квантовая теория, разрабатывавшаяся с 1900 по 1925 г., прогрессировала за счет «беспринципного», хотя и весьма наглого введения и применения специальных правил, а не в результате систематического изучения следствий применения того или иного набора аксиом. Не хочу утверждать, что теория относительности развивалась «лучшим» или более «здоровым» образом, чем квантовая физика, просто подчеркиваю фундаментальные различия в развитии этих двух теорий. Не следует также недооценивать огромного и конкретного вклада первопроходцев и среди них Эйнштейна, создавших старую квантовую теорию. Приводимые ниже четыре уравнения иллюстрируют их достижения лучше, чем иная обширная диссертация:

$$\rho(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3)[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1} \qquad (2.1)$$

— формула Планка для спектральной плотности ρ равновесного излучения черного тела как функции частоты ν и температуры T (h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, c — скорость света). Это самое первое уравнение квантовой теории излучения. Весьма примечательно, что старая квантовая теория возникла из анализа такой сложной проблемы, как излучение черного тела. С 1859 по 1926 г. эта проблема оставалась на переднем крае теоретической физики, сначала в термодинамике, потом в теории электромагнетизма, затем в старой квантовой теории и, наконец, в квантовой статистике;

$$E = h\nu - P \qquad (2.2)$$

— полученное в 1905 г. уравнение Эйнштейна для энергии E фотоэлектронов, выбиваемых с поверхности металла под воздействием света частотой ν (§ 19.5). Это первое уравнение квантовой теории взаимодействия излучения и вещества;

$$c_v = 3R(h\nu/kT)^2 \exp(h\nu/kT)[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-2} \qquad (2.3)$$

— полученное в 1906 г. уравнение Эйнштейна для удельной теплоемкости c_v одного грамм-атома идеального кристаллического твердого тела, все узлы решетки которого испытывают гармонические колебания около положений равновесия с единой частотой ν (R — универсальная газовая постоянная) (гл. 20). Это первое уравнение квантовой теории твердого тела;

$$\mathrm{Ry} = 2\pi^2 e^4 m/h^3 c, \qquad (2.4)$$

где Ry — постоянная Ридберга,— уравнение, предложенное Нильсом Бором в 1913 г., первое уравнение квантовой теории строения атома.

Задолго до того, как удалось понять, какие принципы лежат в основе квантовой теории, успех применения этих уравнений со всей очевидностью продемонстрировал, что такая теория обязана существовать. Каждый ее успех был пощечиной освященным временем классическим концепциям. В различных областях возникали новые внутренние границы, внезапно оспаривались общепринятые истины — оказалось, что закон равнораспределения классической статистической механики, вообще говоря, несправедлив (§ 19.2); электроны, вращаясь по замкнутым орбитам, тем не менее, не излучают.

Старая квантовая теория охватывает 25-летний период революции в физике, революции в том смысле, что в это время рушились существовавшие ранее представления. Теории же относительности, как специальная, так и общая, не были в этом смысле революционными. Их появление не сопровождалось потрясениями, они были распространением существующих представлений на новые области, раздвигали границы познания.

Лучше всего это можно продемонстрировать на простом примере. В соответствии с СТО, физическая сумма $\sigma(v_1, v_2)$ двух скоростей v_1 и v_2, имеющих одинаковое направление, задается выражением

$$\sigma(v_1, v_2) = (v_1 + v_2)(1 + v_1 v_2/c^2)^{-1}. \qquad (2.5)$$

Данный результат был получен независимо Пуанкаре и Эйнштейном в 1905 г. Это уравнение содержит предельный случай $\sigma(v_1, c) = c$ — совершенно новый результат. Отсюда также следует, что для любых скоростей, как бы они ни были малы, классическое выражение $\sigma(v_1, v_2) = v_1 + v_2$ в общем случае неверно. Но так как c здесь порядка миллиарда километров в час, из (2.5) также следует, что классическим результатом по-прежнему можно пользоваться для скоростей, малых по сравнению со скоростью света. Это есть принцип соответствия теории относительности, столь же старый, как и сама теория относительности. Предшественники, от Галилея до Ньютона и Максвелла, могли покоиться в мире и славе.

С квантовой теорией дело обстояло по-иному. Конечно, после вывода выражений для удельной теплоемкости сразу стало ясно, что уравнение (2.3) дает при высоких температурах давно полученное Дюлонгом и Пти значение 6 кал/моль (§ 20.1). Так же немного времени (всего пять лет) ушло на то, чтобы увидеть связь между формулой Планка — уравнением (2.1) и классическим законом Рэлея — Эйнштейна — Джинса ($h\nu \ll kT$) (§ 19.2). Эти два результата указывали на то, что классический статистический закон равнораспределения может оставаться справедливым при таких сравнительно высоких температурах, при которых имеется соответствие между квантовыми и классическими законами. Для уравнений же (2.2) и (2.4) соответствующих предельных значений как не было, так и нет. До 1925 г. ничего не удалось доказать из наиболее фундаментальных соображений.

Лишь после создания квантовой механики, квантовой статистики и квантовой теории поля уравнения (2.1)—(2.4) получили теоретическое обоснование.

Основное достоинство уравнения (2.5) состоит в том, что оно одновременно дает ответ на два вопроса: при каких условиях появляется новое и как новое соотносится со старым? Наличие нового четко указывает на разрыв с прошлым. Непосредственное присутствие старого свидетельствует о наличии этого разрыва, который я называю упорядоченным переходом. В то же время революция в науке происходит, если сначала появляется только новое. С этого момента и до тех пор, пока вновь не будет найдено место для старого, длится революционный период (это не закон, но в физике всегда происходит именно так). Таким образом, появление СТО и ОТО было упорядоченным переходом, в то время как старая квантовая теория развивалась революционным путем. Подчеркиваю, что это различие относится лишь к процессу становления физических теорий, а не к их содержанию. (Я не стану возражать, если кто-нибудь назовет отказ от эфира и абсолютной одновременности в 1905 г. и отказ от ньютонова абсолютного пространства в 1915 г. удивительным, поразительным, смелым, небывалым, дерзновенным или ...революционным шагом.)

Не было человека, который осознал бы глубокие различия в развитии теории относительности и квантовой теории раньше и лучше Эйнштейна, единственного, кто внес вклад в создание обеих из них. И никто лучше него не мог судить о природе научных революций, все-таки он сам был «на баррикадах». Посмотрим же, что он говорил по этому поводу.

В начале 1905 г. Эйнштейн писал одному из друзей о том, что готовятся к печати его работы по квантовой теории и СТО. Первую он назвал «архиреволюционной», о второй же лишь заметил: «...тебя может заинтересовать кинематическая часть» [E3].

В отчете о лекции Эйнштейна по теории относительности, состоявшейся в Лондоне 13 июня 1921 г., читаем: «Он [Эйнштейн] энергично возражал против утверждения, будто новый принцип является революционным. Этот принцип, сказал он, есть прямое следствие, в некотором смысле, естественное завершение работ Фарадея, Максвелла и Лоренца. Более того, в нем нет, тем более преднамеренно [введенного], ничего специфически философского...» [N1].

Осенью 1919 г., разговаривая с одной из студенток, Эйнштейн показал ей телеграмму, в которой сообщалось, что искривление лучей света при их прохождении около Солнца находится в соответствии с теоретически предсказанным им значением. Студентка спросила, а какова была бы его реакция, если бы совпадения не было? Эйнштейн ответил: «Тогда мне было бы жаль господа бога. Теория-то все равно верна» [R1]. Это его заявление отнюдь не противоречит тому, что он был сильно взволнован,

когда впервые услышал об экспериментальном подтверждении вывода об искривлении световых лучей (§ 16.2).

Три приведенных выше примера характеризуют неизменную позицию Эйнштейна, которой он придерживался всю жизнь: теория относительности — упорядоченный переход, а сам он — инструмент в руках творца, который, по его глубокому убеждению, «изощрен, но не злонамерен».

О том, как оценивал Эйнштейн свою роль в квантовой физике, мы можем прежде всего судить по тому, что он назвал свою статью 1905 г. «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» «архиреволюционной» (§ 19.3). Кроме того, он сказал следующее: «То, что мне удалось сделать в области квантовой теории, представляет собой лишь случайные удачи или кусочки, которые мне удалось отбить при безуспешных попытках решить проблему в целом. Мне неловко получать здесь столь высокую награду» [E4]. Эти слова были сказаны 28 июня 1929 г., в день, когда Эйнштейн получил медаль имени Планка из рук самого Планка. К тому времени революционный период развития старой квантовой теории (в точности совпавший с годами наивысшей творческой активности Эйнштейна) сменился периодом развития нерелятивистской квантовой механики (и ее зарождавшегося релятивистского варианта) — теории, которую к 1929 г. практически все признали новой фундаментальной теорией.

Эйнштейн возражал. Ему, вовсе не считавшему теорию относительности революционной, было ясно, что процесс революционного развития квантовой физики еще не закончен. Так он считал до конца своих дней; ему казалось, что старое еще недостаточно хорошо подогнано к новому. Таково предельно краткое резюме взглядов Эйнштейна на науку. В гораздо большей степени, чем революционным взрывам, он был привержен упорядоченным переходам. Он мог быть радикалом, но бунтарем он не был никогда.

В той же лекции 1929 г. он сказал: «...я восхищаюсь работами физиков молодого поколения, объединенными под названием квантовая механика, и верю в правильность этой теории. Я только считаю, что ограничения, приводящие к *статистическому* характеру ее законов, должны быть со временем устранены». Пути стали расходиться. Эйнштейн в одиночестве начал строить фундаментальную теорию, в которой естественным путем сохранялась бы классическая причинность и из которой квантовая механика вытекала бы как конструктивная теория.

По-моему, гораздо интереснее рассмотреть не конкретные критические замечания Эйнштейна в адрес квантовой механики (о чем пойдет речь в гл. 26), а понять *что* им двигало. Что заставляло Эйнштейна продолжать этот поиск, который, по его словам, «со стороны должен выглядеть довольно странно» [E5]? Почему на протяжении всей жизни он продолжал «петь свою старую одинокую песню» [E6]? Как мы увидим в гл. 27, ответ

дает грандиозный замысел Эйнштейна, овладевший им еще до появления квантовой механики,— построение единой физической теории. Эта теория должна была объединить частицы и поля, в ней слились бы общая теория относительности и квантовая теория. Этого ему сделать не удалось. Как, впрочем, и всем остальным.

Знания о явлениях, которые должна была объяснить новая фундаментальная теория, неизмеримо обогатились с того времени, когда Эйнштейн приступил к выполнению своей программы. Чем сложнее оказываются явления, тем более явственно ощущается потребность в их объединении.

Таким образом, любая попытка оценить научные взгляды Эйнштейна неизбежно будет лишь предварительной. Поэтому, возможно, небесполезно вкратце изложить свою точку зрения хотя бы одному физику. Я делаю это в следующем параграфе, который посвящается еще не родившемуся поколению физиков [3]).

§ 2.2. Обращение к будущим физикам

Когда Эйнштейн и другие ученые приступили к выполнению программы объединения, были известны три частицы (в современном понимании) — электрон, протон и фотон, а также два фундаментальных взаимодействия — электромагнитное и гравитационное. В настоящее время частицы насчитываются сотнями, поэтому представляется неизбежным введение их более фундаментальных составляющих. Сейчас считается, что имеется минимум четыре типа фундаментальных взаимодействий. Активно ведется работа над попытками объединения всех четырех типов взаимодействий — гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного, но пока результата добиться не удалось.

Основным инструментом таких исследований являются релятивистские (основанные на СТО) теории поля. Наша вера в правильность такого теоретического подхода основана прежде всего на огромных успехах квантовой электродинамики (КЭД). Один параметр, g-фактор электрона, может одновременно иллюстрировать как степень надежности предсказаний этой теории, так и уровень достигнутой точности измерений:

$$\frac{1}{2}(g-2) = \begin{cases} 1\ 159\ 652\ 460\ (127)(75)\cdot 10^{-12} \text{ — расчет по КЭД [4]);} \\ 1\ 159\ 652\ 200\ (40)\cdot 10^{-12} \text{ — эксперимент.} \end{cases}$$

Тем не менее, теперь ясно, что эта ветвь теории поля сольется с теориями других полей.

---

[3]) В следующем параграфе сделана попытка резюмировать положение дел в физике без разъяснений и ссылок на литературу. Его можно опустить без ущерба для дальнейшего изложения.

[4]) При данном расчете (без учета небольшого вклада мюонов и адронов) в качестве исходного использовалось наиболее точное известное значение постоянной тонкой структуры $\alpha^{-1} = 137{,}035963(15)$. Основной источник погрешности вычисления $g-2$ — неточность в определении α, что приводит к погрешности (127). Погрешность (75) появляются при расчетах в восьмом знаке [K1].

«Если бы мы могли показать Эйнштейну, как объединить теорию относительности и квантовую теорию, разговаривать с ним стало бы значительно легче» [P1]. Сегодня на пути такого объединения стоят концептуальные и технические трудности. Наличие сингулярностей при описании гравитационного коллапса рассматривается некоторыми как признак неполноты уравнений ОТО. Пока неясно, устраняются ли эти сингулярности при учете квантовых эффектов.

Есть надежда, что гравитационные волны будут обнаружены еще в нашем столетии (§ 15.4).

Окончательного объединения слабого и электромагнитного взаимодействий пока добиться не удалось, но похоже, что для этого создан надежный фундамент в виде локальных неабелевых калибровочных теорий со спонтанным нарушением симметрии. В результате широко распространено мнение о том, что слабое взаимодействие переносится массивными векторными мезонами. Ожидается, что такие мезоны удастся обнаружить в текущем десятилетии [5]).

Многие считают, что сильные взаимодействия также описываются локальными неабелевыми калибровочными полями. Предполагается, что для них симметрия не нарушается, поэтому соответствующие векторные мезоны — безмассовые частицы. При этом динамика таких «неабелевых фотонов», видимо, запрещает наличие их в свободном состоянии. Техническая разработка этой теории находится пока на начальном этапе.

Обнадеживающие результаты получены при разработке теории «великого объединения» слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий в одну компактную неабелеву калибровочную группу. В большинстве теорий великого объединения протон оказывается нестабильным, вот почему экспериментальных данных о его судьбе ожидают с таким нетерпением.

Главной же целью является суперобъединение, союз всех четырех сил. Некоторые считают, что цель близка и ответ даст теория супергравитации, однако эту уверенность разделяют не все.

Можно сказать, что все попытки объединения проводятся в рамках программы геометризации, напоминающей ранние попытки Эйнштейна, хотя многообразие, подвергаемое геометризации, гораздо обширней, чем ему представлялось, а уж квантовые рамки программы почти наверняка пришлись бы ему не по вкусу.

В ходе поисков корректной теории поля рассматривались теоретические модели, открывающие возможность существования протяженных объектов (солитонов, инстантонов, монополей). При этом пришлось использовать в физике методы топологии. В итоге за последние десять лет выяснилось, что квантовая теория поля имеет гораздо более богатую структуру, чем казалось ранее. Я имею в виду перенормируемость неабелевых калибро-

[5]) Промежуточные векторные бозоны W^+, W^- массой около 80 ГэВ и Z^0 массой около 90 ГэВ обнаружены в 1983 г. в ЦЕРНе.— *Примеч. пер.*

вочных полей со спонтанным нарушением симметрии, асимптотическую свободу и суперсимметрию.

За появлением множества новых частиц последовали попытки упростить описание глубинной структуры вещества. Сейчас считается, что вещество состоит из двух классов частиц со спином 1/2 — лептонов и кварков, ряда калибровочных бозонов со спином 1, как имеющих массу, так и безмассовых, и (с меньшей достоверностью) фундаментальных частиц со спином, равным нулю. Единственным известным пока калибровочным бозоном является фотон[6]). Обнаружены также три типа заряженных лептонов. Гипотетическими составляющими адронов считаются кварки. На сегодня выделено по крайней мере пять типов кварков. Динамика сильных взаимодействий запрещает образование кварков в виде свободных частиц. Этот запрет («пленение» кварков) не введен пока достаточно убедительно теоретически. Неизвестен также критерий, который мог бы указать, сколько видов лептонов и кварков должно существовать.

Слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия имеют собственные, присущие только им свойства симметрии, но иерархия этих симметрий теоретически еще не понята до конца. Наиболее загадочными представляются небольшие отклонения от инвариантности при пространственной инверсии и еще менее заметные отклонения от инвариантности при обращении времени. Положение усугубляется тем, что последний эффект наблюдался до сих пор лишь в системе $K^0 - \bar{K}^0$. (Эти явления были обнаружены уже после смерти Эйнштейна. Я часто задавал себе вопрос, какова была бы его реакция на эти открытия, особенно, если вспомнить его слова: «Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы» [E7].)

Неизвестно, почему электрический заряд квантуется; ответа на этот вопрос логично ожидать в рамках некой будущей калибровочной теории.

Итак, сегодня физики усердно работают над эйнштейновской программой объединения явлений в рамках единой теории; при этом используются методы, к которым он, вероятно, отнесся бы критически. С начала 70-х годов надежды на успех возросли, но рассматриваемые сейчас теоретические схемы отнюдь не так просты и экономны, как хотелось бы. По всему видно, что теория частиц и теория поля не завершены. Несмотря на значительный прогресс в развитии этих теорий, остается справедливым раннее замечание Эйнштейна: «Теории, которые постепенно приспосабливаются к наблюдаемым данным, приводят к нагромождению разрозненных утверждений» [E8]. В то же время нет экспериментальных фактов или внутренних противоречий, которые указывали бы на то, что постулаты ОТО, СТО и квантовой механи-

[6]) См. примечание на с. 41.— *Примеч. пер.*

ки противоречат друг другу или нуждаются в пересмотре и уточнении. Поэтому сейчас нельзя предсказать, останутся эти постулаты неизменными или же их придется менять.

Я завершаю это обращение комментарием об отношении Эйнштейна к роли безразмерных констант (таких, как постоянная тонкой структуры или отношение массы электрона к массе протона) в законах физики, роли, о которой он ничего не знал и мы ничего не знаем: «В разумной теории нет безразмерных величин, значения которых определяются лишь эмпирически. Я, конечно, не в состоянии доказать, что... безразмерные константы в законах природы, которые могут с чисто логической точки зрения иметь любые значения, не должны существовать. Мне, при моей „вере в бога", это представляется очевидным, но, возможно, лишь очень немногие[7]) придерживаются того же мнения» [E9].

Глава 3. ПОРТРЕТ ФИЗИКА В МОЛОДОСТИ[1])

Обособленно... 4. Отдельно от других; порознь, независимо, индивидуально...

Оксфордский словарь английского языка

Неизвестно, когда Герман Эйнштейн стал партнером предприятия Исраэля и Леви по изготовлению перин, до или после 8 августа 1876 г. Известно лишь, что к тому времени он вместе с матерью, братьями и сестрами уже жил в Ульме, в королевстве Вюртембергском. В 1876 г. 8 августа в синагоге города Ганнитатта он обвенчался с Паулиной Кох. Молодая пара поселилась в Ульме, сначала на Мюнстерплац, а в конце 1878 г. они переехали на Банхофштрассе. Солнечным мартовским днем 1879 г., в пятницу, родился их первенец, гражданин новой Германской империи, к которой Вюртемберг присоединился в 1871 г. На следующий день Герман отправился регистрировать рождение сына. Свидетельство о рождении гласит: «№ 224. Ульм, 15 марта 1879 г. Сегодня торговец Герман Эйнштейн, проживающий в Ульме, Банхофштрассе, 135, иудейского вероисповедания, лично известный, предстал перед нижеподписавшимся регистратором и заявил о рождении ребенка мужского пола, нареченного Альбертом, в Ульме, по его месту жительства, от жены Паулины Эйнштейн, урожденной Кох, иудейского вероисповедания, марта 14 числа 1879 г., в 11 ч 30 мин утра. Прочел, подтвердил и подписал: Герман Эйнштейн. Регистратор: Хартман». В 1944 г. во

---

[7]) Аналогичные идеи высказывали П. А. М. Дирак и А. С. Эддингтон.— *Примеч. ред.*

[1]) Автор перефразирует название романа известного ирландского писателя Дж. Джойса «Портрет художника в молодости».— *Примеч. пер.*

время воздушного налета дом на Банхофштрассе был разрушен. Свидетельство о рождении по-прежнему находится в архиве Ульма.

Альберт был первенцем Германа и Паулины. 18 ноября 1881 г. родился второй ребенок, дочь Мария. Вероятно, на свете не было другого человека, к которому Эйнштейн был так привязан, как к сестре Майе, как ее звали в семье. Выбор имен свидетельствует о тенденции к ассимиляции в семье Эйнштейнов, тенденции, распространенной в среде немецких евреев в XIX в. По словам Элен Дюкас, Альберта назвали (если можно так сказать) в честь деда Абрахама; как было выбрано имя Мария — неизвестно. В семье царил либеральный дух и религия не воспринималась как догма. В такой атмосфере были воспитаны и отец, и мать. Религиозные проблемы, заповеди не обсуждались [M1, с. 12]. Отец Альберта гордился тем, что иудаистские ритуалы в его доме не соблюдались [R1, с. 28].

Биографический очерк Майи, законченный в 1925 г.,— основной источник сведений о ранних годах Альберта. В нем рассказывается об испуге матери при рождении сына: голова у младенца была слишком большая, с угловатым затылком (эта редкая форма черепа сохранилась на всю жизнь); о первых словах бабушки при виде нового члена семейства: «Viel zu dick! Viel zu dick!» («Ой, какой толстый!»); о родительских страхах: не окажется ли ребенок неполноценным, слишком уж долго он не говорит [M1, с. 9—10]. Страхи эти оказались беспочвенными. Судя по рассказу, основывающемуся на воспоминаниях самого Эйнштейна, «... в возрасте между двумя и тремя годами у него появилось стремление говорить целыми фразами. Он пробовал произносить каждое предложение тихонько, про себя. Затем, если оно оказывалось правильным, он произносил его вслух» [S1]. В раннем детстве он был очень тихим, любил играть в одиночестве. Случались, однако, и взрывы эмоций. Он мог внезапно впасть в ярость. «В такие моменты лицо его бледнело, кончик носа белел, и он терял самообладание» [M1, с. 9—10]. Было несколько случаев, когда милый крошка швырял чем попало в сестру. Эти приступы прекратились, когда ему исполнилось семь лет.

Отношения между родителями складывались гармонично, они любили друг друга. Более сильной личностью была мать. Она была талантливой пианисткой, звуки музыки разносились по всему дому, и музыкальное образование детей началось рано. Майя училась играть на фортепиано. Альберт брал уроки музыки с шести до тринадцати лет. Впоследствии скрипка стала его любимым инструментом, хотя в раннем возрасте игра была обременительной обязанностью. Уроки ему давал Шмид [R1, с. 31]. Альберт сам научился немного играть на пианино и очень любил на нем импровизировать. Герман Эйнштейн был человеком уравновешенным, добрым и довольно пассивным; все относились к нему с любовью [R1, с. 24]. Он увлекался литературой и по ве-

черам часто читал домашним Шиллера и Гейне [R1, с. 26]. (Гейне остался одним из любимых авторов А. Эйнштейна.) В школьные годы Герман проявлял математические способности, но мечты об университете не сбылись: у его родителей не было на это средств.

Затея Германа с производством перин оказалась не очень удачной. Вскоре после рождения Альберта энергичный и предприимчивый младший брат Якоб предложил Герману стать его партнером в небольшом предприятии по производству водопроводной и газовой аппаратуры в Мюнхене. Герман согласился взять на себя коммерческое руководство и, кроме того, вложил в дело значительную часть своих и Паулининых сбережений. В 1880 г. Герман с семьей переехали в Мюнхен, о чем в архиве Мюнхена сохранилась запись от 21 июня. Скромное предприятие открылось 11 октября, дело пошло успешно, однако у Якоба были более обширные планы. Через несколько лет у него возникла идея открыть вместе с Германом фабрику по выпуску динамомашин, дуговых ламп и электроизмерительного оборудования для муниципальных электростанций и сетей. Кроме того, он предложил брату купить на двоих дом в Зедлинге, пригороде Мюнхена. Эти планы осуществились в 1885 г. при финансовой поддержке родителей, главным образом отца Паулины. Официально фирма была зарегистрирована 6 мая 1885 г.

Альберт и Майя полюбили новый дом на Адельхайдерштрассе с большим тенистым садом. Дела поначалу шли хорошо. В книге [U1] четыре страницы посвящены фирме «Elektronische Fabrik J. Einstein und Co», откуда видно, что братья поставляли оборудование в Мюнхен-Швабинг, а также в Варезе и Сузу в Италии.

Таким образом, ранние годы Эйнштейн провел в спокойной благоприятной обстановке, что оказало на него благотворное влияние. На седьмом десятке он с особым чувством вспоминал об одном эпизоде тех лет: «Чудо... я испытал ребенком четырех или пяти лет, когда отец показал мне компас» [E1, с. 8]. Это так поразило ребенка, что он «задрожал и похолодел» [R1, с. 25]. «За вещами должно быть что-то еще глубоко скрытое... Развитие... представляет собой в известном смысле... бегство от „удивительного“, от „чуда“» [E1, с. 8]. Такие ощущения дали Эйнштейну гораздо больше, чем формальное образование.

В возрасте пяти лет Альберт впервые сел за уроки. Начали его учить дома, но занятия тут же прекратились, потому что в приливе раздражения он бросил стульчиком в учительницу. В шесть лет он поступил в муниципальную школу. Работал ровно, прилежно и неторопливо, математические задачи решал уверенно, хотя иногда ошибался в вычислениях. Успевал он прекрасно. В августе 1886 г. Паулина писала матери: «Вчера Альберт получил табель, он снова закончил первым, отметки у него превосходные» [E2]. Альберт оставался тихим мальчиком, но любил играть с одноклассниками. Его игры требовали терпения

и целеустремленности. Одним из любимых занятий была постройка карточного домика.

В октябре 1888 г. Альберт перешел из школы в гимназию Луитпольда, где проучился до 15 лет. Все эти годы он был первым или вторым в классе по математике и латыни [H1]. Но в целом гимназия ему не нравилась: властные учителя, подобострастные ученики, зубрежка — все это было ему не по душе. Кроме того, «у него была врожденная неприязнь к гимнастике и спорту... Он быстро уставал, у него кружилась голова» [K1, с. 33]. В гимназии Альберт держался особняком и почти не завел друзей.

Впрочем, у него была масса занятий, выходящих за пределы программы. Дядюшка Якоб давал ему математические задачи, и, решив их, мальчик испытывал чувство огромного счастья [M1, с. 14]. В возрасте от 10 до 15 лет он часто встречался с Максом Талмудом — тот регулярно обедал в доме Эйнштейнов, и эти встречи способствовали расширению его кругозора. Талмуд, бедный студент-медик, приходил обедать каждый вторник. Он давал Эйнштейну популярные научные книги, а потом и работы Канта. Вдвоем они часами беседовали о науке и философии[2]). «За все эти годы я ни разу не видел, чтобы он читал развлекательную литературу. Ни разу не встречал я его в компании одноклассников, сверстников»,— вспоминал потом Талмуд [T1, с. 164—165]. В те годы его единственным развлечением была музыка, он уже играл Моцарта и сонаты Бетховена под аккомпанемент матери [M1, с. 15]. Кроме того, Альберт самостоятельно занимался математикой. В 12 лет он во второй раз пережил чудо — ему подарили небольшую книжку по евклидовой геометрии [H2], которую он назвал «библией геометрии». «...Ясность и уверенность... произвели на меня неописуемое впечатление» [E1, с. 8]. К 17 годам он самостоятельно изучил дифференциальное и интегральное исчисление.

По баварским законам все дети школьного возраста должны были получать религиозное образование. В муниципальной школе детей учили только католическому «закону божьему». Эйнштейна обучал начаткам иудаизма дальний родственник, приходивший домой [M1, с. 11—12]. Когда он пошел в гимназию Луитпольда, обучение продолжалось там. Результатом этих занятий стал период увлечения религией, который Альберт пережил в возрасте 11 лет. Чувства его достигли такого накала, что он в точности исполнял все религиозные предписания, например не ел свинины [M1, с. 13]. Позднее, в Берлине, он рассказал близкому другу, что в этот период сочинил несколько гимнов, обращенных к богу, и с энтузиазмом распевал их по дороге в школу [S2, с. 15]. Под воздействием науки это увлечение внезапно, год спустя, закончилось. Он не участвовал в религиозном обряде

---

[2]) Переехав в США, Талмуд переменил фамилию на Талми. Он написал книгу, в которой рассказал о встречах с Эйнштейном [T1].

совершеннолетия «бар-митцвах», так и не выучил иврита. В 50 лет Эйнштейн писал Генриху Фридману, своему религиозному наставнику гимназических времен: «Я часто читаю библию, но ее текст в оригинале остался для меня недоступным» [E3].

От мюнхенских дней сохранилась и другая история, которую с ликованием иногда рассказывал сам Эйнштейн. Однажды в гимназии учитель посетовал, что Альберт учится в его классе. Эйнштейн возразил, что не делает ничего дурного. На это учитель ответил: «Это верно, но вы там, на задней парте, улыбаетесь, а это нарушает атмосферу уважения, которая так нужна в классе» [S1; S2, с. 15].

Эпизоды из раннего детства Эйнштейна говорят о том, что все наиболее яркие черты его характера были врожденными, а не благоприобретенными. Ребенок, который долго не говорит, становится первым учеником (распространенное мнение о том, что Эйнштейн плохо учился, совершенно необоснованно) и, наконец, ученым, каждой научной победе которого предшествует период неторопливого созревания идеи. Мальчик, улыбавшийся с задней парты, превратился в старика, который, как уже упоминалось в гл. 1, смеялся над глупцами-чиновниками, занимавшимися делом Оппенгеймера. В последние годы пацифистские убеждения заставят его выступать против деспотизма. И все же в жизни и науке он не был бунтарем, идущим против авторитетов, не стремился он, кроме единственного случая[3]), ниспровергать эти авторитеты. Вернее всего, он был настолько независим, что любая форма власти, кроме власти разума, казалась ему невероятно смешной. Что же касается его увлечения религией, то оно прошло бесследно — позднее так случалось с научными идеями, когда он загорался, а потом быстро остывал, если идея казалась ему не заслуживающей внимания. Об этом религиозном периоде сам Эйнштейн вспоминал так: «Мне ясно, что этот потерянный религиозный рай юности был для меня первой попыткой освободиться от пут „только личного"» [E1, с 4]. Это стремление сопровождало его всю жизнь. Когда ему было за шестьдесят, Эйнштейн заметил однажды, что продал душу и тело науке, стремясь убежать от «личного» к «надличному» [E4]. Но он не устанавливал дистанции между собой и другими. Его отстраненность была в нем самом и позволяла ему идти по жизни, погрузившись в размышления. Необычно скорее то, что Эйнштейн все же не порвал связей с миром, не стал равнодушным созерцателем.

Другая — и самая важная черта его характера — обособленность, видна уже в ребенке, играющем в одиночестве. Она проявлялась и в том, что собственные размышления он ставил куда выше формальных школьных занятий, а в студенческие годы

[3]) Единственной подлинно революционной была его статья 1905 г. о световых квантах. Следует подчеркнуть, что, по его мнению, физический смысл гипотезы о световых квантах так и не был понят до конца. Я еще вернусь к этому в следующих главах.

больше был занят самообразованием, чем посещением лекций, и в том, что позднее, в годы службы в патентном бюро, был занят исключительно творческой работой почти в полном одиночестве, без связей с кругом физиков. Та же черта проявлялась и в отношениях с другими людьми и с властями. Обособленность сослужила ему хорошую службу в его целеустремленной и выполнявшейся в одиночку работе, что особенно заметно на примере пути, пройденного от специальной теории относительности к общей. Та же черта хорошо заметна в его глубоко скептическом отношении к квантовой механике на протяжении второй половины жизни. В конце концов обособленность стала для него и насущной необходимостью, охранявшей столь любезное ему уединение от публики, обожающей легенды о гениях.

Но вернемся к мюнхенским годам. Дела Германа, поначалу удачные, шли все хуже. Синьор Гарроне, представитель итальянской фирмы, предлагал перевести фабрику в Италию, где перспективы были гораздо радужнее. Якоб был полностью с ним согласен, его энтузиазм заразил Германа. В июне 1894 г. фабрика в Зедлинге была ликвидирована, дом продан и семейство переехало в Милан. Уехали все, кроме Альберта, который остался, чтобы закончить гимназию. Новая фабрика открылась в Павии. В 1895 г. Герман с семьей переехал из Милана в Павию, где они поселились на Виа Фосколо, 11 [S3].

Одиночество угнетало Альберта, он нервничал [M4]. Без родных было тоскливо, гимназию он не любил. Ему исполнилось 16 лет, и перед ним замаячила военная служба[4]). Не посоветовавшись с родителями, Альберт решил присоединиться к ним. Взяв у семейного врача справку о нервном истощении, он получил освобождение от занятий в гимназии и ранней весной 1895 г. отправился в Павию. Родителям, которых его внезапный приезд огорчил, пообещал, что самостоятельно подготовится к вступительным экзаменам в Цюрихский политехникум и, кроме того, сообщил им о своем желании отказаться от германского гражданства [F1]. Новая, более свободная жизнь и независимость в учебе превратили тихого мальчика в общительного молодого человека. Природа Италии и ее искусство произвели на него большое впечатление [M1, с. 16].

В октябре 1895 г. Альберт отправился в Цюрих сдавать экзамены в политехникум. Он не поступил, хотя успешно сдал математику и естественные науки[5]). Последовав совету получить

---

[4]) По закону только мальчики до 17 лет могли уезжать из Германии и не возвращаться для прохождения службы в армии. Отвращение Эйнштейна к армии проявилось еще в детстве, когда он с родителями смотрел военный парад. Его напугали движения, которые люди совершали, казалось, помимо своей воли. Родителям пришлось обещать ему, что он никогда не станет военным [B1, с. 26].

[5]) Он сдавал экзамены по истории, немецкому и французскому языкам, биологии, математике, начертательной геометрии, химии, физике, черчению; писал сочинение.

аттестат зрелости, который позволил бы ему поступить в политехникум, он поселился в Аарау, в немецкой части Швейцарии, в семье Винтелеров. К Йосту Винтелеру, учителю и неплохому ученому, он испытывал искреннее уважение, к фрау Винтелер глубоко привязался. Альберт близко сошелся с их семью детьми и стал своим. Впервые в жизни он получал удовольствие от занятий в школе. Незадолго до смерти Эйнштейн писал: «Эта школа оставила во мне неизгладимый след благодаря своему либеральному духу и скромной серьезности учителей, которые не опирались на какие-либо показные авторитеты».

С фотографии, снятой в Аарау, на нас смотрит уверенный в себе, почти дерзкий, молодой человек, в лице которого нет и следа робости прежних лет. Позднее один из одноклассников вспоминал его энергичную, уверенную походку, чуть насмешливое выражение лица, «его смелость в выражении своего мнения, пусть даже обидного для собеседника» [S2, с. 21—22]. Возможно, он и прежде был в себе уверен. Теперь это стало заметно.

От тех дней сохранилось краткое сочинение Эйнштейна, озаглавленное «Мои планы на будущее». Это сочинение, написанное на далеком от совершенства французском языке приблизительно в 1895 г., показывает присущую ему целеустремленность. В переводе оно звучит так:

«Мои планы на будущее

Счастливый человек слишком доволен настоящим, чтобы задумываться о будущем. Молодые же люди, с другой стороны, любят строить смелые планы. К тому же для серьезного молодого человека естественно желание составить как можно более точное представление о желаемых целях.

Если мне повезет и я сдам экзамены, то я поступлю в политехникум в Цюрихе. Там я четыре года буду изучать математику и физику. Я представляю себя преподавателем этих дисциплин, предпочтительно теоретиком.

Вот причины, которые привели меня к таким планам. Прежде всего, это моя склонность к абстрактному математическому мышлению, отсутствие воображения и практической сметки. Мои желания совпадают со склонностями. Это вполне естественно, ведь всякому приятно заниматься тем, к чему у него больше склонностей. Кроме того, занятия наукой дают определенную независимость, которая меня очень привлекает» [E5].

В 1896 г. статус Эйнштейна изменился: из немецкого школьника он превратился в не имеющего гражданства студента политехникума. Уплатив три марки, он получил из Ульма документ, датированный 28 января 1896 г., который подтверждал, что он более не является германским (а точнее вюртембергским) гражданином. Осенью он успешно сдал экзамен на аттестат зрелости с такими оценками (высший балл — 6): немецкий — 5, итальянский — 5, история — 6, география — 4, алгебра — 6, геометрия — 6, начертательная геометрия — 6, физика — 6, химия — 5, естественная история — 5, рисование — 4, черчение — 4. Двадцать

девятого октября он зарегистрировался как житель Цюриха и стал студентом политехникума. Успешно завершив четырехлетний курс, он должен был получить диплом учителя математики и физики старших классов средней школы. В студенческие годы (с 1896 по 1900 г.) Эйнштейн жил на 100 швейцарских франков в месяц, 20 из них он откладывал каждый месяц на оплату документов, необходимых для получения швейцарского гражданства [6]).

В это время у его родителей начались денежные затруднения. Фабрика Германа и Якоба в Павии потерпела крах, и в 1896 г. ее пришлось ликвидировать. Бо́льшая часть семейных сбережений, вложенных в это предприятие, пропала. Якоба взяли на работу в крупную фирму. Герман решил самостоятельно открыть новую фабрику, на этот раз в Милане. Напрасно Альберт отговаривал отца от очередной затеи. Он даже ездил к дяде в Германию и просил его не помогать отцу деньгами. Его мольбам никто не внял. Эйнштейны вернулись в Милан, и все началось сначала. Прошло два года, и Герману снова пришлось свернуть дело. В то время Альберт писал сестре: «Бедствия моих несчастных родителей, которые долгие годы не знают ни одного счастливого дня, сильно угнетают меня. Мне больно смотреть на это как стороннему зрителю, ведь я уже взрослый человек... но помочь им не могу ничем. Я для них обуза... Лучше мне было бы умереть. Одна только мысль... что год за годом я не позволял себе ни удовольствий, ни развлечений, поддерживает меня и часто помогает в минуту отчаяния» [M1, с. 18]. Это меланхолическое настроение прошло, когда отец вновь нашел работу, связанную с монтажом электростанций.

В студенческой жизни Альберта бывали и приятные моменты. Изредка он позволял себе сходить на концерт или в театр, зайти в кафе с приятелями или приятно провести время в семье историка Альфреда Штерна, побывать у Марселя Гроссмана, сокурсника и друга. В Цюрихе Эйнштейн познакомился с Мишелем Анжело Бессо, ставшим его другом на всю жизнь. Тогда и позднее Эйнштейн наслаждался дарами дружбы и прекрасного — литературы и музыки. Но даже в молодости ничто не могло отвлечь его от призвания, которое он с поэтической точностью описал в 18 лет: «Напряженная работа и созерцание природы... вот ангелы, которые поддержат и укрепят мой дух и поведут меня через бури жизни» [E6].

«Я бо́льшую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом»,— писал позднее Эйнштейн о годах, проведенных в политехникуме [E1, с. 14]. Впрочем, предложенные им эксперименты

---

[6]) В газете «Tagesblatt der Stadt Zürich» за 1895 г. встречаются такие типичные объявления: «Маленькая меблированная комната — 20 швейцарских франков в месяц, двухразовое питание в пансионе — 1 франк 40 сантимов в день. Комната получше с пансионом — 70 франков в месяц». (Приношу благодарность Ресу Посту за эти сведения.) Итак, средства Эйнштейна были скромными, но не скудными.

его руководитель Генрих Фридрих Вебер встретил без энтузиазма. В частности, он не разрешил Эйнштейну провести опыт по обнаружению движения Земли относительно эфира [R1, с. 52] (см. § 6.4). Однажды он якобы сказал: «Вы способный молодой человек, Эйнштейн, очень способный, но у Вас есть один крупный недостаток — Вам ничего нельзя сказать» [S2, с. 48]. Его увлечение экспериментом ослабло. В журнале физико-математического факультета политехникума записано серьезное предупреждение Эйнштейну за пропуски лабораторных занятий.

На Эйнштейна курс физики, который читал Вебер, не произвел впечатления. Ему «не очень понравилось введение в теоретическую физику, он был разочарован тем, что не узнал ничего нового о теории Максвелла...». Как типичный представитель классической физики, Вебер просто игнорировал все, что появилось после Гельмгольца [S2, с. 47]. Впрочем, были и предметы, которые очень интересовали Эйнштейна[7]). Позднее он несколько раз отзывался об Адольфе Гурвице и Германе Минковском как о превосходных преподавателях математики [R1, с. 48; E6][8]). Но в целом нельзя сказать, чтобы Эйнштейн прилежно посещал лекции и занятия. Он гораздо больше полагался на самостоятельную работу. В студенческие годы он читал работы Кирхгофа, Герца и Гельмгольца, изучил теорию Максвелла по первому изданию книги Августа Фёппля [F1], которое вышло в 1894 г., прочел книгу Маха по механике — книгу, которая, по словам Эйнштейна, «своим критическим отношением к основным концепциям и законам» произвела на него «глубокое впечатление» [S2, с. 54]; изучал работы Лоренца и Больцмана[9]). Среди других работ, привлекших его внимание, была книга Дарвина [R1, с. 48].

«Сдавали всего два экзамена; в остальном можно было делать более или менее то, что хочешь... Это давало свободу в выборе занятия вплоть до нескольких месяцев перед экзаменом, свободу, которой я широко пользовался» [E1, с. 16]. Подготовку к экзаменам Эйнштейну облегчил Марсель Гроссман, который предоставил ему свои конспекты лекций, аккуратно записанные и разложенные по порядку[10]). И все же эти месяцы, когда приходилось работать по чьей-то указке, были для него большим испытанием. Прошел целый год после выпускных экзаменов, прежде чем Эйнштейн вновь почувствовал вкус к физике [E1, с. 16]. Он получил такие оценки: 5 по теоретической физике; 5 по экспериментальной физике и астрономии; 5,5 по теории функций; 4,5 за работу по теплопроводности (при высшем бал-

---

[7]) Полностью учебная программа приведена в [S2, с. 38—40].

[8]) Интересно, что Эйнштейн посетил несколько лекций Гейзера по дифференциальной геометрии [R1, с. 28, 49]. О влиянии Гейзера на Эйнштейна я расскажу в § 12.2.

[9]) Я не нашел никаких свидетельств существования переписки Эйнштейна с Больцманом, на которую есть ссылки в [M1, с. 20; S2, с. 43].

[10]) Эти конспекты теперь хранятся в историческом собрании Цюрихской библиотеки.

ле 6). И вот в августе 1900 г. Эйнштейн получил диплом вместе с тремя другими студентами, каждый из которых тут же занял должность ассистента в политехникуме [S2, с. 48]. Пятая студентка — Милева Марич — экзаменов не сдала [11]). Сам Эйнштейн оказался без работы.

Для него это было ударом. Он так до конца и не простил Веберу, что, посулив ему место ассистента, тот ничего не сделал [12]). В сентябре в письме Гурвицу он спрашивал, будет ли его кандидатура рассматриваться в связи с открывшейся вакансией ассистента [E9]. Несколько дней спустя он снова писал: «Я с радостью вижу, что есть надежда получить это место» [E10]. Однако из этого ничего не вышло. Год подходил к концу, а он все еще не нашел работу.

Все же были у него и удачи. В декабре 1900 г. он закончил первую статью о межмолекулярных силах и послал ее из Цюриха в журнал «Annalen der Physik» [E11]. Накопив, наконец, нужную сумму, 21 февраля 1901 г. Эйнштейн получил швейцарское гражданство [13]). Он остался швейцарским гражданином на всю жизнь и считал Швейцарию «прекраснейшим уголком земли» [S2, с. 415].

В начале 1901 г. Эйнштейн вновь пытался найти работу в университете. «Я пробыл три недели у родителей [в Милане], занимаясь поисками места ассистента в каком-нибудь университете. Я давно нашел бы работу, если бы не Вебер, который вел со мной нечестную игру» [E12]. В марте 1901 г. он отослал экземпляр своей первой статьи Вильгельму Фридриху Оствальду в Лейпциг вместе с письмом, в котором интересовался: «...возможно, у Вас найдется место для специалиста по математической физике, знакомого с методами физических измерений» [E13]. В апреле он написал Хейке Камерлинг-Оннесу, чтобы узнать о возможности получить работу в Лейдене [E14]. Может быть, ответов Эйнштейн не получил. Во всяком случае, его попытки найти место успехом не увенчались. Он был обескуражен, как мы знаем из письма его отца Оствальду [14]): «Мой сын глубоко разочарован своим теперешним положением — он без работы. День за днем в нем растет убеждение, что его карьера не удалась... Сознание того, что он обуза для нас, людей малосостоятельных, тяготит его» [E15]. Герман просил Оствальда написать Альберту хотя бы несколько слов ободрения в связи с его пер-

---

[11]) Милева сделала вторую попытку в июле 1901 г. и снова провалилась.

[12]) После смерти Вебера в 1912 г. Эйнштейн написал в совершенно не свойственной ему манере: «Смерть Вебера пойдет политехникуму на пользу» [E8].

[13]) Официально он подал прошение о получении швейцарского гражданства 19 октября 1899 г. Десятого января 1900 г. его отец подписал требуемое заявление о том, что он не возражает против этого [F2, с. 43—44]. Тринадцатого марта 1901 г. его признали негодным к службе в армии из-за плоскостопия и варикозного расширения вен.

[14]) Письма Г. Эйнштейна Оствальду воспроизводятся в [K2].

вой публикацией. Девять лет спустя Эйнштейн и Оствальд приедут в Женеву получать почетные докторские степени. А еще год спустя Оствальд первым выдвинет кандидатуру Эйнштейна на присуждение Нобелевской премии [15]).

В конце концов Эйнштейн нашел временную работу: 19 мая он поехал в Винтертур, в среднюю школу, замещать одного из учителей. Винтелеру он писал, что против ожидания получает от преподавания большое удовольствие. «После пяти или шести утренних уроков я не ощущаю усталости и после обеда занимаюсь в библиотеке или работаю дома над какой-нибудь интересной темой... Я не стремлюсь теперь в университет, так как вижу, что при таких условиях у меня остаются силы и желание заниматься наукой» [16]) [E16]. Из Винтертура он писал Гроссману, что занят кинетической теорией газов и размышлениями о движении материи относительно эфира [E17].

После Винтертура ему подвернулась другая временная работа. В сентябре 1901 г. он получил место в частной школе в Шафхаузене [F2, с. 34]. Эта работа тоже оставляла время для занятий физикой. В декабре 1901 г. он писал: «С сентября 1901 г. я работаю учителем в частной школе в Шафхаузене. За два месяца работы здесь я написал диссертацию по кинетической теории газов. Месяц назад я подал свою диссертацию на рассмотрение в Цюрихский университет» [17]). За эту работу степень ему присуждена не была [18]). Но эта неудача оказалась для Эйнштейна последней. Примерно в то же время он переехал из Шафхаузена в Берн, где ему было суждено провести самые плодотворные годы жизни. Мысль о переезде в Берн подал Марсель Гроссман. В 1900 г. в разговоре с родителями он упомянул о трудностях, которые испытывает Эйнштейн в поисках работы. В результате его отец порекомендовал Альберта Фридриху Галлеру, директору Федерального патентного бюро в Берне. Эйнштейн был очень благодарен за эту рекомендацию [19]). Наконец, в декабре 1901 г. в газете «Schweizerische Bundesblatt» появилось сообщение об открывшейся в бюро вакансии. Эйнштейн сразу же послал туда письмо с заявлением о принятии на должность [E18]. Позднее с ним беседовал сам Галлер. Возможно, Галлер обнадежил его. Во всяком случае, из школы он уволился и пе-

---

[15]) См. гл. 29.

[16]) В том же письме Эйнштейн писал, что познакомился с одним из ведущих немецких физиков. Я так и не смог установить, кого он имел в виду.

[17]) В те времена политехникум еще не присваивал степени доктора физических наук.

[18]) Найти ответ из Цюриха, касающийся предложенной Эйнштейном диссертации, я не смог. Эта работа по кинетической теории газов была позднее опубликована [E19]. Поначалу Эйнштейн предполагал представить более полный вариант работы по межмолекулярным силам на соискание докторской степени [E12].

[19]) Эйнштейн выразил свою благодарность в письме Марселю Гроссману от 14 апреля 1901 г. [E12], а не 1902 г., как указано в [S2, с. 89].

реехал в Берн в феврале 1902 г., не имея еще работы. Поначалу он существовал на маленькое содержание, которое ему посылали родители, и подрабатывал, давая уроки физики и математики. Вот как один из учеников Эйнштейна описал его: «Роста около 175 см, широкоплечий, немного сутулый, кожа чуть смуглая, чувственный рот, черные усы, нос с небольшой горбинкой, блестящие карие глаза, приятный голос, правильный французский с легким акцентом» [F2, с. 11]. Здесь Эйнштейн познакомился с Морисом Соловином, «славным Соло», который пришел к нему брать уроки и стал другом на всю жизнь. Эйнштейн, Соловин и еще один друг Альберта, Конрад Габихт, регулярно собирались поговорить о философии, физике, литературе — от Платона до Диккенса. Они торжественно объявили себя основателями и единственными членами «Академии Олимпия», обедали втроем, чаще сосисками, сыром, фруктами и чаем, и, как правило, превосходно проводили время [20]). Наконец, Федеральный совет утвердил назначение Эйнштейна. С 16 июня 1902 г. он назначался техническим экспертом третьего класса с годовым жалованьем в 3500 швейцарских франков, с испытательным сроком.

Еще до переезда в Берн Эйнштейн строил планы жениться на студентке политехникума, с которой часто встречался в Цюрихе, говорил о науке. Эта была Милева Марич (Марити). Она родилась в 1875 г. в Тителе, в Венгрии, в католической семье. Отец и мать Эйнштейна возражали против этого брака, «возможно, у них были другие планы» [M1, с. 23]. В 1902 г. между Эйнштейном и его матерью возникли трения. Мать так и не стала лучше относиться к Милеве [E21]. Этот год был для Паулины тяжелым. Неудачи, выпавшие на долю Германа, подорвали его крепкое здоровье. Внезапно смертельная болезнь подкосила его. Эйнштейн приехал из Берна в Милан, чтобы провести с отцом последние дни. На смертном одре отец согласился на этот брак. Почувствовав приближение конца, Герман попросил всех оставить его, он хотел умереть в одиночестве. По словам Элен Дюкас, эти минуты Альберт всегда вспоминал с чувством вины. Герман Эйнштейн умер 10 октября 1902 г. Похоронили его в Милане.

Альберт Эйнштейн и Милева поженились 6 января 1903 г. Для друзей они устроили маленькую вечеринку. Домой пришли поздно, и Альберту пришлось будить хозяина дома, так как ключ он забыл [M1, с. 23]. Много позднее Эйнштейн вспоминал, что все в нем противилось этому браку [E23]. В 1904 г. 14 мая у них родился сын Ганс Альберт, продолжатель рода Эйнштейнов.

Эйнштейн прижился в патентном бюро. Он серьезно относился к работе и часто находил в ней что-либо интересное. У него

---

[20]) Когда Эйнштейну было уже за шестьдесят, он вспоминал о тех временах: «...мы управляли своей веселой „Академией", которая была на деле куда менее инфантильной, чем те благопристойные академии, которые я позднее наблюдал изнутри» [E20]. Лучше всего «Академию» описал Соловин, который среди авторов, прочитанных ее членами, вспоминает Спиноза, Юма, Маха, Пуанкаре, Софокла, Расина и Сервантеса [S4].

всегда хватало времени и энергии на занятия наукой. В 1903, 1904 гг. он опубликовал работы по основам статистической механики. К 16 сентября 1904 г. испытательный срок закончился, и Эйнштейн был зачислен в штат. «Дальнейшее продвижение,— писал Галлер,— будет возможно, когда Эйнштейн овладеет техническими дисциплинами, так как раньше он занимался физикой» [F2, с. 67].

Ни до, ни после никому не удавалось так расширить горизонты физики за столь краткий отрезок времени, как это сделал Эйнштейн в 1905 г. Написанные им тогда работы будут, конечно, подробно рассмотрены в следующих главах[21]). Здесь я замечу только, что в марте он закончил статью, которая принесла ему Нобелевскую премию, а в апреле — работу, за которую ему была присвоена степень доктора физики в Цюрихском университете.

В 1906 г. 1 апреля Эйнштейна повысили в должности — он стал экспертом второго класса, жалованье его составляло теперь 4500 франков. Он освоил технические дисциплины и, как писал Галлер, «стал одним из самых ценных экспертов в нашем бюро» [F2, с. 65]. В конце 1906 г. Эйнштейн закончил фундаментальную статью по удельной теплоемкости. Кроме того, он находил время писать рефераты для «Annalen der Physik» [K3]. В конце 1907 г. Эйнштейн сделал первые шаги на пути к созданию ОТО (см. гл. 9).

На этом я заканчиваю очерк жизни молодого физика. Бернский период еще не окончен, но уже открылась новая страница в жизни Эйнштейна — научная карьера (см. § 10.1).

В преклонном возрасте Эйнштейн вспоминал, что больше всего ему помог Гроссман, когда через отца рекомендовал его в патентное бюро [E24]. Это верно. Финансовые дела шли не блестяще, женитьбу нельзя было назвать удачной. Но бернский период для Эйнштейна, человека, любившего размышлять в одиночестве, был ближе всего к раю на Земле.

* *
*

При работе над этой главой я старался, насколько возможно, пользоваться оригинальными материалами. Особую ценность при этом имели, конечно, архив Эйнштейна в Принстоне и помощь Элен Дюкас. Я также широко использовал материалы научно-исторического собрания библиотеки Цюрихского политехникума, где большую помощь мне оказал д-р Б. Глаус. Кроме того, я опирался в своей работе на следующие биографии Эйнштейна:

1. Albert Einstein, Beitrag für sein Lebensbild — рукопись Майи Эйнштейн. Закончена во Флоренции 15 февраля 1924 г.

---

[21]) Диссертация и работа о броуновском движении обсуждаются в гл. 5, СТО — в гл. 6—8, гипотеза о световых квантах — в гл. 19.

Оригинал хранится в семье Бессо, в Принстонском архиве имеется копия.

2. *Reiser A.* Albert Einstein, a Biographical Portrait.— N. Y.: A. and C. Boni, 1930. Автор — Антон Райзер (псевдоним Рудольфа Кайзера). Эйнштейн так писал об этой книге в 1931 г.: «Книга Райзера является, по моему мнению, лучшей из написанных моих биографий. Она принадлежит перу человека, хорошо знающего меня лично». (Кайзер, знаток и ценитель немецкого языка, в течение многих лет был главным редактором влиятельного берлинского ежемесячника «Neue Rundschau»; он также был преподавателем и автором ряда книг. В 1924 г. женился на падчерице Эйнштейна Ильзе.)

3. Автобиография Эйнштейна, опубликованная в книге Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949 [22]). Наиболее автобиографическая из всех работ Эйнштейна. Имеет исключительную ценность.

4. *Seelig C.* Albert Einstein.— Zürich: Europa Verlag, 1960 [23]). Книга частично построена на обширной переписке автора с А. Эйнштейном, Марго Эйнштейн и Элен Дюкас и представляет собой дополненное переиздание вышедшей в 1954 г. биографии. (Автор не рекомендует пользоваться английским переводом этой книги.)

5. *Hoffmann B., Dukas H.* Albert Einstein, Creator and Rebel.— N. Y.: Viking, 1972 [24]).

6. *Flückiger M.* Albert Einstein in Bern.— Bern: Paul Haupt Verlag, 1974. Ниже ссылки обозначаются буквой F. Книга содержит ряд фотографий редких документов, относящихся к юности Эйнштейна. В тексте имеется ряд неточностей.

7. *Frank P.* Albert Einstein, Sein Leben und Seine Zeit. Braunschweig: Vieweg, 1979. Это немецкое издание лучше английского перевода Einstein, His Life and Time (N. Y.: Knopf, 1947), так как в последнем выпущена значительная часть текста. Немецкое издание содержит также написанное Эйнштейном предисловие, в котором он говорит, что содействовал написанию этой книги.

8. Einstein und Ulm/H. E. Specker, Ed.— Stuttgart: Kohlhammer, 1979. Книга содержит сведения о предках Эйнштейна, в том числе его родословную.

9. Albert Einstein in Berlin 1913—1933/C. Kirsten, H. J. Treder, Eds.— Berlin: Akad. Verlag, 1979. Аннотированное собрание документов из архивов Прусской академии наук. Отличное издание.

---

[22]) Перевод на русский язык имеется в т. 4 Собрания научных трудов Эйнштейна (М.: Наука, 1967).— *Примеч. пер.*

[23]) Перевод на русский язык: *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн: Пер. с нем.— 2-е изд.— М.: Атомиздат, 1966.— *Примеч. пер.*

[24]) Перевод на русский язык: *Хофман Б.*/При участии Э. Дюкас. Альберт Эйнштейн: творец и бунтарь: Пер. с англ.— М.: Прогресс, 1983.— *Примеч. пер.*

Глава 4. ЭНТРОПИЯ И ВЕРОЯТНОСТЬ

§ 4.1. Кратко о вкладе Эйнштейна

Эйнштейн посвятил вопросам термодинамики, статистической механики и кинетической теории газов первую свою статью, законченную в конце 1900 г., и продолжал работать в этой области четверть века, написав около 40 статей, так или иначе связанных с этими проблемами. Первых успехов он добился в 1905 г., когда теоретически разработал три различных метода определения постоянной Авогадро.

В опубликованных в 1949 г. автобиографических заметках Эйнштейн лишь бегло коснулся своего вклада в статистическую физику: «Не будучи знакомым с появившимися ранее исследованиями Больцмана и Гиббса, которые по существу исчерпывают вопрос, я развил статистическую механику и основанную на ней молекулярно-кинетическую теорию термодинамики. При этом главной моей целью было найти такие факты, которые возможно надежнее устанавливали бы существование атомов конечной величины» [E1]. Здесь он имел в виду три статьи [1]), опубликованные в период с 1902 по 1904 г., когда он «заново открыл все основные элементы статистической механики» [B1, с. 46]. В то время его познания о трудах Людвига Больцмана были весьма фрагментарны, а с трактатом Джозайи Уилларда Гиббса [G1] он вообще не был знаком. В 1910 г. Эйнштейн писал, что будь он знаком с работой Гиббса, то не стал бы публиковать свои статьи по основам статистической механики, за исключением нескольких комментариев [E2]. В солидном обзоре концептуальных основ статистической механики, завершенном в том же году его друзьями и почитателями Паулем Эренфестом и Татьяной Эренфест-Афанасьевой, об этих статьях упоминается лишь мельком, в приложении [E3]. Верно, что его статьи 1902—1904 гг. немного добавили нового к пониманию статистических основ второго начала термодинамики. Верно и то, что, как указывал сам Эйнштейн [E4], эти статьи не являются необходимой пред-

[1]) В 1901 г. он направил первую из этих статей в Цюрих в надежде, что она может быть принята в качестве докторской диссертации (см. гл. 3).

посылкой для понимания его работы 1905 г. о реальности существования молекул. Тем не менее, те ранние статьи имели большое значение для его дальнейшего научного роста. В частности, в них содержатся ростки теории флуктуаций, которую он с несравненным мастерством применял с 1905 по 1925 г.

Было бы, однако, совершенно неверно считать основной вклад Эйнштейна в статистическую физику и кинетическую теорию всего лишь изобретательным применением хотя и открытых им независимо от других, но, тем не менее, известных ранее принципов. Возьмем, например, подход к броуновскому движению. В нем россыпи новых идей: частицы взвеси ведут себя подобно молекулам раствора; имеется связь между диффузией и вязкостью (первое из всех установленных флуктуационно-диссипативных соотношений); среднее квадратическое смещение частиц можно связать с коэффициентом диффузии. Заключительный вывод[2]) о том, что постоянную Авогадро можно определить на основе визуальных наблюдений с помощью обычного микроскопа, не может не вызывать восхищения, даже если читал статью раньше и знаешь в чем ее суть. После 1905 г. Эйнштейн однажды заметил: «Удивительно, как это Больцман не сделал столь очевидного вывода [т. е. не дал объяснения броуновскому движению], ведь он сам заложил фундамент решения этой проблемы» [S1]. Трудно, однако, вообразить себе, что неприступный Больцман рассматривает проблему существования молекул в таком серьезном, но в то же время непринужденном стиле, как это сделал Эйнштейн.

Еще более новаторским является применение Эйнштейном статистического подхода к квантовой физике. В его первой статье, посвященной этой проблеме, гипотеза световых квантов выдвигалась на основе статистических соображений. Эта работа была закончена за два месяца до статьи о броуновском движении. После 1905 г. Эйнштейн изредка возвращался к классической статистической физике, но позднее его основные работы по статистике относились к квантовой теории. Можно сделать и более сильное утверждение: основные работы Эйнштейна по квантовой теории являются в своей основе статистическими. К ним относятся статьи по удельной теплоемкости, корпускулярно-волновому дуализму, работы по корпускулярной природе световых квантов, спонтанному и индуцированному излучению и новому выводу закона излучения черного тела. В последний раз Эйнштейн коснулся статистики уже тогда, когда она отошла для него на второй план [S2], в конце 1924 — начале 1925 г.; в то время он уже был поглощен построением единой теории поля. Три написанные в тот период статьи вывели его на самый рубеж волновой механики.

Ввиду того, что работы Эйнштейна по статистической физике охватывают столь обширную область, подробному обсуждению

---

[2]) Ход рассуждений подробно обсуждается в гл. 5.

основных вопросов необходимо предпослать краткий хронологический обзор.

1901—1902 гг. Термодинамика поверхности жидкостей [E5] и электролиза [E6]. В этих статьях Эйнштейн искал экспериментальное подтверждение гипотезы о молекулярных силах. Проводя аналогию с тяготением, он предположил, что потенциал взаимодействия молекул двух типов i и j имеет вид $c_i c_j \varphi(r)$, где c — характеристика того или иного типа, а $\varphi(r)$ — универсальная функция расстояния. По дальнейшей аналогии с тяготением он предположил, что каждая из величин c_i имеет вид $\sum c_\alpha$, где c_α — числовой параметр α-го атома в молекуле типа i. Эйнштейну удалось связать параметры c с удельным объемом, поверхностным натяжением и его производной по температуре. Использовав имеющиеся данные, он проверил свою гипотезу: оказалось, что она неплохо работает для ограниченного числа углеродных соединений (с молекулярным весом [3]) порядка 100), но не для более легких молекул, таких как молекулы воды.

Гипотеза Эйнштейна, конечно же, неверна. Как теперь хорошо известно, даже в простейших полуфеноменологических моделях, таких как потенциал Ленарда-Джонса, значение молекулярных сил определяется не только характеристической константой взаимодействия, но и размером молекул. Первая статья Эйнштейна интересна лишь тем, что она показывает, как он с самого начала стремился к поиску универсальных принципов, в данном случае аналогии между молекулярными силами и тяготением. «Следует указать на то,— писал он,— что с возрастанием атомного веса постоянные c в общем случае увеличиваются, хотя не всегда и не пропорционально. Вопрос о том, нет ли какой-либо связи между нашими [молекулярными] силами и силами гравитационными, должен оставаться пока совершенно открытым» [E5]. Во второй статье [E6] он также стремился обосновать предложенный им закон для молекулярных сил. На этот раз необходимых для сопоставления с теорией экспериментальных данных не было. В заключение статьи Эйнштейн приносит извинения за то, что был не в состоянии лично внести вклад в экспериментальную проверку своих идей.

То, что Эйнштейна глубоко волновала концепция универсальных молекулярных сил, видно из его письма Гроссману от 1901 г. «Я уверен теперь, что моя теория сил притяжения... может быть распространена на газы... Тогда будет гораздо легче решить вопрос о том, насколько тесная связь существует между молекулярными силами и ньютоновыми силами дальнодействия» [E7]. За этим следует лирическое отступление: «Как прекрасно чувство узнавания объединяющих черт в сложных явлениях, которые воспринимаются как совершенно не связанные между собой».

---

[3]) В книге при изложении истории открытий, как правило, оставлены термины и единицы, использовавшиеся в то время.— *Примеч. ред.*

В декабре 1907 г. Эйнштейн писал Штарку: «Посылаю Вам... все мои публикации, за исключением не имеющих ценности первых двух статей» [E8]. Здесь мы впервые встречаемся с типичной чертой характера Эйнштейна, сохранившейся у него на всю жизнь. Он мог загореться какой-то идеей, а потом безболезненно отказаться от нее, как от совершенно несущественной.

Я так подробно остановился на первых двух статьях Эйнштейна лишь для того, чтобы потом не было нужды к ним возвращаться. Сделаю два заключительных замечания: 1) одно термодинамическое соотношение, приведенное в первой статье, дожило до наших дней [4]); 2) в 1911 г. он еще раз ненадолго вернулся к молекулярной теории явлений на поверхности жидкости в коротком комментарии к полученному Этвешем соотношению между силой поверхностного натяжения, удельным объемом и температурой [E6].

1902—1904 гг. Три исследования по основам статистической механики. В первой статье речь идет об определении температуры и энтропии в условиях теплового равновесия, а также о законе равнораспределения [E10]; во второй — о необратимости [E11]; в третьей — о флуктуациях и новых способах определения постоянной Больцмана [E12]. В 1911 г. Эйнштейн опубликовал краткий комментарий к этим статьям [E2].

Март 1905 г. Основанная на статистике Больцмана гипотеза световых квантов [E13]. Первое корректное применение закона равнораспределения к излучению.

Апрель 1905 г. Докторская диссертация, посвященная новому методу определения размеров молекул [E14]. Поправка к этой работе была опубликована в 1911 г. [E15], а краткий комментарий — в 1920 г. [E16].

1905—1908 гг. Ряд работ по броуновскому движению. Первая и наиболее важная датируется маем 1905 г. [E17]. Дополнение 1906 г. касается вращательного броуновского движения [E18]. Краткий комментарий о толковании понятия средней скорости был опубликован в 1907 г. [E19], а популяризованное изложение проблемы броуновского движения вышло в свет в 1908 г. [E20].

1906 г. Квантовая теория удельной теплоемкости твердых тел [E21]. Этой работой начинается развитие квантовой теории твердого тела.

1907 г. Способ измерения постоянной Больцмана по флуктуациям напряжения в конденсаторе [E22]. Релятивистское преобразование термодинамических величин [E23] [5]).

1909 г. Две статьи, в которых подробно обсуждается вопрос о флуктуациях энергии электромагнитного излучения относитель-

---

[4]) Пусть l — удельная теплоемкость жидкости, находящейся в сосуде при постоянном давлении p, ω — площадь поверхности жидкости, σ — сила поверхностного натяжения. Эйнштейн вывел соотношение [E5] $\partial l/\partial\omega = -T(\partial^2\sigma/\partial T^2)_{p,\omega}$. Этот результат обсуждался Шотки [S3].

[5]) Об исторической значимости этой работы пока судить рано [L1].

по значения, соответствующего равновесию, и впервые в истории физики упоминается корпускулярно-волновой дуализм; к этому выводу Эйнштейн пришел на основе толкования выражений, описывающих такие флуктуации. Рассмотрение броуновского движения на примере зеркала, равномерно движущегося в поле излучения [E24, E25].

1910 г. Статистические аспекты движения резонатора в поле излучения [E26, E27]; комментарий был опубликован в 1915 г. [E28]. Теория критической опалесценции [E29].

1911 г. Два комментария к статье 1906 г. об удельной теплоемкости [E21]: попытки связать удельную теплоемкость твердых тел с их упругими свойствами [E30] и уточнить сделанное ранее для простоты предположение о том, что колебания узлов решетки можно приближенно считать монохроматическими [E31].

1912—1913 гг. Термодинамика фотохимических процессов [E32, E33].

1914 г. Неудавшаяся попытка объяснить аномалии удельной теплоемкости газов [E34].

1916—1917 гг. Три сходные по теме, но не идентичные статьи, касающиеся процессов спонтанного и индуцированного излучения (введение коэффициентов A и B), новый вывод закона излучения черного тела, теория броуновского движения молекулярного газа, находящегося в равновесии с излучением, из которой следуют свойства импульса световых квантов [E35 – E37]

1924 г. Качественный подход к теплопроводности газов для случая, когда средний свободный пробег молекул мал по сравнению с линейными размерами сосуда [E38]. В то время некоторые ученые считали, что отклонение крылышек радиометра вызывается радиационным давлением. Статья Эйнштейна, дополняющая более раннюю работу Кнудсена, помогла отказаться от этого неверного представления.

1924—1925 гг. Три статьи по квантовой теории молекулярного газа; открытие явления конденсации, названного по имени Эйнштейна и Бозе; применение в последний раз теории флуктуаций, которое привело Эйнштейна к введению понятия корпускулярно-волнового дуализма вещества методом, отличным от предложенного ранее де Бройлем [E39—E41].

Обзоры. В 1911 г. Эйнштейн проанализировал результаты исследований удельной теплоемкости, выступая на первом Сольвеевском конгрессе [E42]. В 1915 г. он написал в популярной форме обзор по проблемам кинетики [E43].

Этим завершается краткое знакомство с работами Эйнштейна по статистической физике и смежным областям. Позднее я, конечно, вернусь к основным работам, вкратце перечисленным выше, и рассмотрю их более подробно. В § 4.3, 4.4 речь пойдет о статьях 1902—1904 гг. и об интересе Эйнштейна к принципу Больцмана. Глава 5, начинающаяся с вводных замечаний об

исключительно сложном положении, сложившемся в XIX в. вокруг вопроса о реальности существования молекул, посвящена в основном докторской диссертации Эйнштейна, броуновскому движению и критической опалесценции. Все те из упомянутых выше работ, в которых речь идет о квантовой физике, будут рассмотрены в гл. 19—24.

В начале этого параграфа я упомянул, что когда 70-летним Эйнштейн ретроспективно оценивал свою работу, он не очень детально остановился на своем вкладе в статистическую физику. В то время его гораздо больше упомянутых выше статей занимали теория относительности и критика квантовой механики [E1]. Перечислением работ Эйнштейна я хотел, кроме того, показать, что, окидывая взглядом прошлое, он не охватил всех областей, которыми занимался.

Отношение Эйнштейна к принципиальным проблемам статистической механики легче всего понять, если вначале вкратце напомнить о вкладе Максвелла и, в особенности, Больцмана. Работ Гиббса в этом обзоре мы касаться не будем, так как они не повлияли на Эйнштейна, и, кроме того, как заметил Лоренц в присутствии Эйнштейна, его подход отличался от подхода Гиббса [L2]. Эйнштейн ничего не возразил и, более того, отвечая на замечание Лоренца, сказал: «Для [моей] точки зрения характерно, что используется (временна́я) вероятность состояния, [определяемая] чисто феноменологически. Это дает то преимущество, что в основу рассмотрения не требуется класть никакой определенной элементарной теории (например, статистической механики)» [E42, с. 407]. Его критическое отношение к подходу Больцмана, о котором можно догадаться из приведенного выше высказывания, будет обсуждаться в § 4.4. В этой главе я хотел бы также пояснить, что имел в виду Эйнштейн, говоря о феноменологическом подходе.

В заключение хотелось бы отметить, что Эйнштейн занимался статистической механикой до появления работ, в которых указывалось на некорректность эргодической гипотезы Больцмана. Поэтому в дальнейшем эргодическая гипотеза рассматриваться не будет.

§ 4.2. Максвелл и Больцман [6])

На надгробии Больцмана, который похоронен на центральном кладбище Вены, выбито:

$$S = k \log W. \tag{4.1}$$

«Неважно, что не Больцман записал это уравнение в таком виде. Впервые это сделал Планк... Константу k также ввел Планк, а не Больцман» [S4]. Символ k был введен в XX в. и впервые использован в формуле Планка [P1] для распределения

[6]) При работе над этим параграфом неоценимую помощь мне оказали исследования М. Клейна, посвященные трудам Максвелла и Больцмана.

энергии в спектре излучения черного тела, предложенной 14 декабря 1900 г.[7]):

$$\rho(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3)[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}. \qquad (4.2)$$

Величина $\rho(\nu, T)d\nu$ есть объемная плотность излучения в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ при температуре T. Уравнение (4.1), или (в более удобном виде) выражение

$$S = k \ln W + \text{const}, \qquad (4.3)$$

впервые также появилось в статье Планка, законченной несколькими неделями позже [P3]. Лоренц до 1911 г. называл k *постоянной Планка*, причем так же поступали и другие.

Уравнение (4.3), основной смысл которого состоит в том, что второй закон термодинамики может быть понят только как связь между энтропией и вероятностью, представляет собой одно из великих достижений науки XIX столетия[8]). Первым, кто заметил статистическую природу второго закона, был, очевидно, Максвелл[9]). В письме о своих демонах, написанном, видимо, в начале 1868 г., он так говорит об их названии, характеристиках и назначении:

«1. Кто дал им это имя? Томсон[10]).

2. Что они собой представляют? Это очень маленькие, но весьма подвижные существа, которые не способны выполнять работу, но могут открывать и закрывать перегородки, движущиеся без трения и инерции.

3. Для чего они нужны? Чтобы показать, что второй закон термодинамики имеет лишь статистический характер...» [M2].

Когда Максвелл писал эти строки, Больцман уже пытался

---

[7]) Открытие Планка будет подробно обсуждаться в гл. 19. Уравнение, эквивалентное (4.2), но в котором в явном виде еще не присутствуют h и k, было предложено Планком 19 октября того же года [P2].

[8]) Следует помнить, что первый закон термодинамики (невозможность создания вечного двигателя первого рода) был установлен в период с 1830 по 1850 г. Это открытие было сделано независимо многими учеными, в том числе инженерами и физиологами [K1]. Закон сохранения энергии для чисто механических систем был известен, конечно, гораздо раньше. Второй закон был открыт в 1850 г. [C1] Рудольфом Юлиусом Эмануэлем Клаузиусом в ходе его размышлений над работами Сади Карно. В своем первоначальном виде (принципа Клаузиуса) второй закон гласил, что без каких-то сопутствующих изменений теплота не может передаваться от более холодного тела к более теплому. Термин «энтропия» также был введен Клаузиусом в 1865 г.; тогда он сформулировал оба закона следующим образом: «Энергия мира есть величина постоянная, энтропия его стремится к максимуму». При этом Клаузиус отметил, что «второй закон термодинамики воспринимается с гораздо большим трудом, чем первый» [C2].

[9]) Точка зрения Максвелла на второй закон более подробно обсуждается Клейном [K2].

[10]) Имеется в виду Уильям Томсон, позднее лорд Кельвин, барон Ларгский. В декабре 1867 г. в письме Питеру Гатри Тейту Максвелл предложил ввести «существо конечных размеров, которое может определять траектории и скорости всех молекул, просто наблюдая за ними» [M1]. Тейт показал письмо Томсону, который и придумал для этих «существ конечных размеров» имя «демоны».

вывести второй закон, но еще не понимал его статистического характера. В первой работе Больцмана на эту тему (1866) ясно говорится о том, что ее цель «дать наиболее общее доказательство второго закона теплоты, а также открыть соответствующую ему теорему механики» [B2][11]). Позднее, в 1871—1872 гг., он по-новому подошел к этой проблеме: «Проблемы механической теории теплоты являются.... проблемами теории вероятностей» [B3]. Новое его доказательство основывалось на так называемом кинетическом методе [E3, K3]. В первых двух статьях Больцман рассматривал соотношение, выражающее равновесие между энтропией, теплотой и температурой [B4]. Дополнение, появившееся в 1872 г. [B3], представляет собой одну из его важнейших работ. В нем содержится уравнение Больцмана. Там также формулируется H-теорема: имеется величина, позднее названная H, определяемая через плотность распределения скоростей и имеющая свойство $dH/dt \leqslant 0$, такая, что с точностью до отрицательного постоянного множителя H можно отождествить с энтропией. При выводе этой теоремы используются как принципы механики, так и вероятностный подход. (В тот период Больцман выполнил столь же важную работу по закону равнораспределения, а в 1876 г. дал вывод «закона» Дюлонга — Пти. Обсуждение проблем, связанных с равнораспределением и удельной теплоемкостью, отложено до гл. 20.)

Однако и тогда Больцман еще не освободился от некоторых заблуждений. Он считал, что ему удалось продемонстрировать абсолютный характер второго закона — то, что H не может расти ни при каких обстоятельствах. Заключительный шаг он сделал, размышляя[12]) над замечаниями Иоганна Иозефа Лошмидта [L4], которые, пользуясь современной терминологией, можно сформулировать следующим образом. Рассмотрим большое число частиц, движущихся при полностью определенных начальных условиях и подчиняющихся стандартным инвариантным относительно обращения времени законам Ньютона. Предположим, что H со временем уменьшается. Тогда для другой системы, отличающейся от первой только тем, что в начальных условиях изменен на обратный знак времени, значение H с течением времени должно увеличиваться. Таким образом, закон роста энтропии не может быть абсолютным. Больцман сразу же понял глубину этого замечания [B5] и в важной работе, опубликованной в 1877 г. [B6], наконец, пришел к современной точке зрения: с приближением к равновесию рост энтропии характеризует не единственно возможный, а лишь наиболее вероятный ход событий. Как замечание Лошмидта помогло Больцману, так и Больцман через 20 лет помог Планку, когда тот пытался вывести за-

---

[11]) Аналогичная попытка была предпринята в 1871 г. Клаузиусом [C3] и вызвала, к веселому изумлению Максвелла, спор о приоритете между ним и Больцманом [K2].

[12]) О влиянии идей Лошмидта на Больцмана см., в частности, [K3].

кон распределения для спектра равновесного излучения черного тела, исходя из предположения, что увеличение энтропии есть абсолютный закон. В ходе возникшей между ними полемики Больцман смог первым доказать обратимость времени в теории электромагнетизма: уравнения Максвелла инвариантны по отношению к одновременному изменению направления времени и магнитного поля при сохранении электрического поля неизменным [B7]. Вообще говоря, именно Больцману мы обязаны первым четким заявлением о том, что в инвариантной относительно обращения времени динамике макроскопическая необратимость связана с тем, что в подавляющем большинстве случаев физическая система переходит из начального в такое конечное состояние, которое почти никогда не является менее вероятным [13]). Больцман также первым показал, что такое толкование может нуждаться в пересмотре при наличии неинвариантных относительно обращения времени динамических сил [14]).

Рассмотрим теперь, как Больцман определял понятие термодинамической вероятности. Фактически в его трудах можно найти два таких определения. Первое датируется 1868 г. [B9]: пусть имеется система из N бесструктурных частиц с фиксированной полной энергией. Изменение состояния этой системы во времени можно представить как орбиту на поверхности постоянной энергии в $6N$-мерном фазовом пространстве (позднее названном Г-пространством [E3]). Состоянию S_i ($i = 1, 2, \ldots$) системы соответствует некая точка орбиты. Это состояние определено до малой «широты», и, таким образом, соответствующая точка орбиты определяется в малой окрестности. Понаблюдаем за системой в течение длительного времени τ. В этот период система находится в состоянии S_i в течение времени τ_i. Тогда τ_i/τ (при $\tau \to \infty$) определяется как вероятность пребывания системы в состоянии S_i. Это мы будем называть *первым* больцмановским определением вероятности.

Ранее я уже упоминал о критическом отношении Эйнштейна к некоторым идеям Больцмана. Но это никак не относится к первому определению вероятности. Можно даже сказать, что это определение Эйнштейну нравилось больше других, тем более что он сам вывел его независимо от Больцмана в 1903 г. [E11],

---

[13]) Квантовомеханическую версию H-теоремы см. в [P4].

[14]) См. [B8]. Наиболее важным начальным условием нашего физического мира является выбор Вселенной Фридмана (в которой, похоже, мы живем) как единственно реализуемого решения инвариантных относительно обращения времени уравнений гравитационного поля. Высказывалось мнение, что данный конкретный выбор реализуемой Вселенной служит одним из свидетельств неполноты известных сейчас физических законов. Предполагается, что не все физические законы должны быть симметричны относительно времени и что нарушение этой симметрии, наблюдавшееся в нейтральной системе K-частиц, является лишь первым признаком асимметрии и, возможно, потребуется пересмотр принятых взглядов на статистическую «стрелу времени». Подробно все эти вопросы обсуждаются Пенроузом [P5].

очевидно, не зная о его работе 1868 г. (Лоренц позднее назвал такое определение «временным ансамблем» Эйнштейна [L3]; надо отметить, что это не самое удачное из названий.) Эйнштейн в основном делал оговорки в отношении второго определения вероятности, данного Больцманом в статье 1877 г. [B6]. В ней Больцман впервые применил новый инструмент, так называемый статистический метод, при котором нет нужды рассматривать в явном виде соударения частиц и частоту их соударений, как это делается в кинетическом методе. Его новый подход годился лишь для состояний, близких к равновесию [B10]. Сам он применил этот метод только к идеальному газу [B11]. Для данного случая Больцман не только дал свое второе определение вероятности, но также показал, как непосредственно можно рассчитать эту вероятность подсчетом микросостояний (или «комплексий», как называл их Больцман).

Для лучшего понимания некоторых возражений Эйнштейна (§ 4.4) и для облегчения дальнейшего обсуждения различий между классической и квантовой статистиками (гл. 23) необходимо напомнить основные сведения об этой процедуре подсчета [15]).

Предположим, я показываю кому-нибудь два одинаковых шарика, лежащие на столе, а потом прошу его закрыть глаза и через несколько мгновений вновь их открыть. Затем я спрашиваю, поменялись ли шарики местами. Наблюдатель не может дать ответа на этот вопрос, так как шарики одинаковы. Но мне ответ известен. Если я поменял шарики местами, значит, я был в состоянии проследить за непрерывным процессом перемещения, в ходе которого шарики перешли из начального положения в конечное. Этот простой пример иллюстрирует первую аксиому классической механики, предложенную Больцманом, которая, по сути, гласит, что идентичные частицы, неспособные сблизиться на бесконечно малое расстояние, можно различить, если знать начальные условия и соблюсти условие непрерывности их движения. Как подчеркивал Больцман, это предположение «дает нам единственную возможность распознавать одну и ту же материальную точку в различные моменты времени» [B13]. По словам Эрвина Шрёдингера: «Никто до Больцмана не счел нужным определить, что имеется в виду под „одной и той же материальной точкой“» [S5]. Итак, с классической точки зрения можно говорить о газе с энергией E, состоящем из N идентичных различимых молекул.

Рассмотрим затем (следуя Больцману) частный случай модели идеального газа, в котором энергии индивидуальных частиц могут принимать лишь дискретные значения ε_1, ε_2, ... Пусть

---

[15]) См. статью Лоренца [L3] об эквивалентности этого метода с микроканоническим ансамблем Гиббса. Понятие ансамбля, как подчеркивал Гиббс в предисловии к своей книге по статистической механике [G1], вытекает из работы Больцмана [B12].

имеется n_i частиц с энергией ε_i, так что

$$N = \sum_i n_i, \qquad E = \sum_i \varepsilon_i n_i. \tag{4.4}$$

Так как газ идеален, состояния частиц не коррелированы, и, следовательно, априори частицы могут находиться в любой точке одночастичного фазового пространства (μ-пространства), т. е. статистически они независимы. Кроме того, они являются различимыми в том смысле, как об этом сказано выше. Следовательно, число комплексий, соответствующих распределению (4.4), задается выражением

$$w = N! \Big/ \prod_i n_i!. \tag{4.5}$$

Больцман полагал w пропорциональным вероятности распределения, определяемого частицами $(n_1, n_2, \ldots)$. Это мы будем называть его *вторым* определением вероятности.

Для полноты дальнейшего изложения мне придется упомянуть о дальнейшем развитии этого вопроса, в котором Больцман участия не принимал. Число микросостояний w сейчас называют «мелкозернистой» вероятностью. Для анализа общих макроскопических свойств системы очень удобно использовать свернутое (сокращенное) описание, которое приводит к так называемой «крупнозернистой» вероятности [16]), понятию, восходящему к Гиббсу. Процедура при этом следующая. Разделим μ-пространство на ячейки $\omega_1, \omega_2, \ldots$ такие, что частица в ω_A имеет среднюю энергию E_A. Распределим N частиц так, чтобы в ω_A было N_A частиц:

$$N = \sum_A N_A, \tag{4.6}$$

$$E = \sum_A E_A N_A. \tag{4.7}$$

Набор значений (N_A, E_A) определяет крупнозернистое состояние. Для частного случая модели идеального газа из уравнения (4.5) следует, что объем Г-пространства W, соответствующий распределению (4.6), (4.7), равен

$$W = N! \prod_A \left(\omega_A^{N_A} / N_A! \right), \tag{4.8}$$

где W — крупнозернистая вероятность. Равновесное состояние соответствует максимальному значению W_{max}, являющемуся функцией N_A и зависящему от ограничений, накладываемых уравнениями (4.6) и (4.7). Таким образом, распределение Мак-

---

[16]) Термины *мелкозернистая* и *крупнозернистая* были предложены Эренфестами [E3, разд. 23].

свелла — Больцмана следует [17]) из предельного случая

$$\sum_A \delta N_A (\ln \omega_A - \ln N_A - \lambda + \beta E_A) = 0. \qquad (4.9)$$

Значение энтропии в равновесном состоянии S_{eq} задается выражением [см. (4.3)]

$$S_{eq} = k \ln W_{max} + \text{const}, \qquad (4.10)$$

а из $\partial S_{eq}/\partial E = T^{-1}$ следует $\beta^{-1} = kT$.

Теперь читатель знаком с тем, чего достигли предшественники Эйнштейна. Завершаю я этот раздел тремя заключительными комментариями.

Первое определение вероятности, вводимое через время пребывания системы в том или ином состоянии, является определением естественным, непосредственно связанным с наблюдением. Например, наиболее вероятно то состояние, в котором система пребывает максимальное время. Второе определение (либо для w, либо для W) не связано непосредственно с наблюдением; это своего рода декларативное утверждение. Однако оно имеет то преимущество, что позволяет облегчить вычисления. Логика, естественно, требует, чтобы эти два определения были эквивалентны, чтобы «время пребывания в том или ином состоянии» было пропорционально «объему пространства Г». В этом и состоит глубокая и пока не до конца решенная проблема эргодической теории [18]). Больцман прекрасно понимал необходимость демонстрации этой эквивалентности. Эйнштейн, с его мощной физической интуицией, был вполне согласен с первым определением, но испытывал сомнения по поводу второго.

Далее, почему Больцман сам не ввел символ k [19])? Ведь в его статье 1877 г. [B6] имеется раздел, озаглавленный «Связь энтропии с величиной, которую я назвал вероятностью распределения». Этой величиной, по сути, является $\ln W$. Более того, в этом же разделе он отмечает, что $\ln W$ «совпадает с энтропией с точностью до постоянного множителя и аддитивной постоянной». Ему было также неплохо знакомо уравнение (4.9) с входящими в него двумя лагранжевыми множителями [B14]. Мне кажется, что Больцман не получил уравнения (4.3) из-за того, что его занимало не столько применение уравнения, аналогичного (4.3), к практическим расчетам, сколько осознание смысла

---

[17]) Для классического идеального газа можно получить распределение Максвелла — Больцмана непосредственно из уравнений (4.4) и (4.5); именно так и поступил Больцман.

[18]) Введение к этой проблеме см., например, в [U1] и [V1].

[19]) Если говорить о возможностях, то первым k мог ввести Максвелл в 1860 г., когда он получил свое распределение по скоростям, где впервые появился множитель Больцмана. Максвелл записал этот множитель в виде $\exp(-v^2/\alpha^2)$, где v — скорость; он показал, что α^2 пропорционально среднему значению v^2, и прекрасно знал, что это среднее значение пропорционально T.

второго закона термодинамики. Надеюсь, что когда-нибудь историей этого вопроса займется кто-то другой, лучше меня знакомый с трудами Больцмана.

Наконец, уравнение (4.3), очевидно, является более общим, чем (4.10). Больцман понимал это: «[ln W] относится также к необратимому телу [20]) и постоянно возрастает в ходе [этого процесса]» [B6]. Первым, кто использовал уравнение (4.3) в его широком смысле, был Эйнштейн. И именно Эйнштейн в своей статье 1905 г. о световых квантах [E13] дал этому уравнению единственно уместное наименование «принципа Больцмана».

§ 4.3. Прелюдия к 1905 г.

Больцман был выдающимся лектором, но по его научным статьям, часто неоправданно растянутым, иногда труднопонимаемым и перегруженным, этого не скажешь. Бывает, что основной вывод запрятан где-то посредине длиннейшего ряда выкладок. Кроме того (и особенно это относится к теоретическому толкованию второго закона), Больцман мог от статьи к статье резко менять точку зрения, не предупреждая об этом читателя [21]). Максвелл так отозвался о его трудах: «Читая Больцмана, я не мог его понять. Он не понимал меня из-за сжатости моего изложения, а для меня как была, так и осталась камнем преткновения его многословность» [M3]. Эйнштейн однажды сказал своему студенту: «Работы Больцмана читать совсем не легко. Среди крупных физиков есть такие, кто их не понял» [S6, с. 176] [22]). Он произнес это в 1910 г., когда был профессором Цюрихского университета. К тому времени он, очевидно, уже прочитал основной труд Больцмана о статистико-механическом выводе второго закона, вышедший в 1877 г., судя по тому, что в 1909 г. сослался на эту работу (впервые за все время!) [E44]. Однако очень сомнительно, чтобы в то время, когда Эйнштейн сам работал в этой области (с 1901 по 1904 г.), он был знаком с указанной статьей или со статьей 1868 г., в которой Больцман дал свое первое определение вероятности.

Эйнштейну, видимо, трудно было следить за публикациями в научных журналах. Вспомните, что первые три статьи по основам статистической механики он заканчивал, еще работая учителем в Шафхаузене [23]). Похоже, что переезд в Берн не облегчил ему доступа к научной литературе [E45]. Неясно также, читал ли он в то время работы Максвелла по кинетической теории. Точно известно, что английского языка он тогда не знал, так как начал изучать его только около 1909 г. [S6, с. 198],

---

[20]) Несомненно, вместо «тела» здесь должен быть «процесс».

[21]) Стиль Больцмана подробно обсуждается в работе Клейна [K3].

[22]) В статье, написанной Эренфестами для энциклопедии, имеется несколько осторожных фраз типа: «Как представляется ...цель этой работы Больцмана состоит в том...» [E3, разд. 11].

[23]) См. гл. 3.

причем познания его в этой области оставались рудиментарными вплоть до переезда в США [24]).

Тем не менее, Эйнштейн знал о некоторых достижениях Максвелла и Больцмана. Как он отметил в одной из своих первых статей по статистической физике [E10]: «Максвелл и Больцман в своих теориях почти достигли этой цели», т. е. вывода закона теплового равновесия и второго закона термодинамики из уравнений механики и теории вероятностей. Однако он тут же заметил, что цель все же не достигнута, и он своей работой попытается «восполнить этот пробел», оставленный двумя учеными. Насколько он был знаком с трудами Максвелла и Больцмана, можно судить по единственной в статье Эйнштейна ссылке. А ссылается он на лекции Больцмана по теории газов [B15], двухтомный труд, содержащий много результатов оригинальных исследований. Служить резюме предыдущих работ Больцмана он, безусловно, не может. Книга в основном строится на применении кинетического метода (уравнения Больцмана); комментарии же, посвященные статистическому методу, относительно кратки. Там упоминается формула подсчета комплексий [B6], однако Больцман пишет: «Я вынужден здесь лишь бегло коснуться этого метода». После этого он завершает рассмотрение данного вопроса ссылкой на свою статью 1877 г. Кроме того, мне кажется, что Эйнштейн знал о работах Максвелла по кинетической теории только то, что излагал в своих лекциях Больцман. В результате Эйнштейн не имел истинного представления о пробелах в аргументации Максвелла и, в особенности, Больцмана, почему, кстати, и не мог их «восполнить». Чтение статьи Эйнштейна [E10] не облегчается и тем, что он не сформулировал ясно, в чем, по его мнению, заключались эти пробелы. Данная статья посвящена исключительно тепловому равновесию. Кроме того, она содержит статистическое толкование температуры, энтропии и закона равнораспределения. Инструмент, который использовал Эйнштейн для своих построений, теперь называется каноническим ансамблем. Статья добротна, но не очень интересна и, как признавал сам Эйнштейн [E2], неважно написана.

Эйнштейн считал, что в следующей своей статье, законченной в 1903 г. [E11], он доказал второй закон для необратимых процессов. На этом этапе ему, естественно, потребовалось некое определение термодинамической вероятности W, и именно тогда он независимо от Больцмана дал свое первое определение, выражаемое через время пребывания в соответствующей области Г-пространства. Доказательство логически корректно, но базируется на ошибочной посылке: «Нам придется предположить, что более вероятные распределения состояний всегда будут следовать за менее вероятными, т. е. что W *всегда* (курсив мой.— *А. П.*) возрастает, пока распределение состояний не станет по-

[24]) Элен Дюкас, частное сообщение. Возможно, однако, что Эйнштейн читал один из переводов «Теории теплоты» Максвелла на немецкий, вышедших в 70-е годы прошлого века.

стоянным и вероятность W — максимальной» [E46]. Через три дня после отправки статьи в журнал «Annalen der Physik» Эйнштейн писал Бессо: «Теперь эта проблема совершенно ясна и понятна; я полностью удовлетворен своей работой» [E47]. Книгу Больцмана он изучал с 1901 г. [E48]. Больцман упомянул о возражении Лошмидта в своей обычной манере — почти незаметно, где-то в середине текста [B15, т. 1, разд. 6]. Эйнштейн, видимо, пропустил это возражение; во всяком случае, до 1903 г. он явно не подозревал об основной тонкости в доказательстве второго закона, а именно о том, что рост энтропии является наиболее вероятным, а не единственно возможным процессом.

Лишь в 1910 г. «вывод» Эйнштейна был впервые подвергнут критике. Тогда Пауль Герц отметил, что «если предположить, как это сделал Эйнштейн, будто за менее вероятными всегда следуют более вероятные распределения, то этим вводится особое неочевидное допущение, явно нуждающееся в доказательстве» [H1]. Весьма примечательный комментарий! Герц не говорит: «Это предположение неверно». Он просит доказательств. Это лишь один из примеров того, что к концу первого десятилетия XX в. идеи Больцмана не были усвоены даже многими из тех, кто активно работал на переднем крае статистической физики. Более широкие круги ученых познакомились с трудами Больцмана только после того, как они были подробно прокомментированы в работе Эренфестов, вышедшей в 1911 г. [E3].

Не менее примечателен и ответ Эйнштейна Герцу, также написанный в 1910 г. [E2]. Он соглашается с возражением Герца и добавляет: «Мой вывод не удовлетворял меня уже тогда [в 1903 г.] и поэтому я вскоре опубликовал второй вывод». Он содержится в единственной работе, законченной Эйнштейном в 1904 г. [E12][25]). Это действительно другой вывод, поскольку в нем используется канонический ансамбль, но по-прежнему содержится критиковавшееся Герцем допущение.

Интересно, но вовсе не удивительно, что в 1903—1904 гг. Эйнштейн из-за своей изоляции не заметил тонкости с обращением знака времени. Даже великий Больцман проглядел это за 30 лет до него. Но переписка Эйнштейна с Герцем происходила в 1910 г., когда Эйнштейн был профессором в Цюрихе (и в летний семестр этого года читал курс лекций по кинетической теории теплоты [S6, с. 169]). К этому времени (как упоминалось выше) он уже прочел работу Больцмана 1877 г., в которой утверждалось, что энтропия растет не всегда, а *почти* всегда. За месяц до ответа Герцу Эйнштейн вполне правильно сформулировал второй закон в другой статье[26]). Можно лишь заключить, что, отвечая Герцу, он был не очень внимателен.

---

[25]) Работы Эйнштейна 1902—1904 гг. обсуждаются также в [K4, K5].

[26]) Необратимость физических процессов является только кажущейся. «Система, *очевидно* (курсив мой.— *А. П.*), будет переходить в состояния с большей вероятностью, если она находится в состоянии с относительно меньшей вероятностью» [E29].

Здесь уместно напомнить об обмене мнениями, который произошел между Эйнштейном и Эренфестом при их первой личной встрече в феврале 1912 г. в Праге. Эйнштейны пришли на вокзал встречать супругов Эренфестов. После первых приветствий «разговор зашел о физике, и они углубились в обсуждение эргодической гипотезы» [K6].

Итак, каких же результатов добился за это время Эйнштейн? Он написал пять статей. Первые две, посвященные поиску универсальных молекулярных сил, справедливо забыты (§ 4.1). Одна из основных задач других трех — установление динамических основ законов термодинамики — также не была решена полностью. Ничто не предвещало расцвета 1905 г., началом которого послужила его следующая статья. Пока ничто... Есть, однако, один (еще не упоминавшийся) аспект в его краткой статье 1904 г., в котором содержится намек на будущие успехи. Возможно, что в 1902—1904 гг. Эйнштейн еще не ухватил сути грандиозных проблем (до сих пор являющихся объектом активных исследований), которые следовало решить, чтобы заложить фундамент второго закона термодинамики, способный выдержать придирчивые испытания на математическую строгость. Но эти первые шаги сыграли важную роль в его научном развитии. В 1904 г. они подвели его к вопросам: каков смысл постоянной Больцмана; как можно измерить ее значение? Отвечая на них, Эйнштейн сделал значительный вклад в статистическую физику и совершил свое наиболее крупное открытие в квантовой теории.

Во вступлении к статье 1904 г. Эйнштейн написал об уравнении (4.3) как о выражении для энтропии системы... найденном Больцманом для идеальных газов и введенном Планком в его теории излучения [E12]. Здесь впервые в трудах Эйнштейна упоминается Планк и здесь же впервые угадывается его беспокойство по поводу того, как используется в квантовой механике статистический подход. Похоже, что он какое-то время уже размышлял над смыслом таинственного уравнения (4.2). Много позднее он писал: «Вскоре после 1900 г., т. е. вскоре после основополагающей работы Планка, мне стало ясно, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность (за исключением предельных случаев)» [B1, с. 52].

Утверждение о несправедливости термодинамики относится, конечно, к флуктуационным процессам. Эйнштейн впервые обратился к флуктуациям в 1904 г., когда рассмотрел систему с переменной энергией E, находящуюся в тепловом равновесии с гораздо большей второй системой при температуре T. Равновесная энергия $\langle E\rangle$ первой системы задается выражением

$$\langle E\rangle = \left(\int_0^\infty E \exp(-\beta E)\,\omega(E)\,dE\right)\Big/\left(\int_0^\infty \exp(-\beta E)\,\omega(E)\,dE\right), \quad (4.11)$$

$$\beta = 1/kT,$$

где $\omega(E)$ — плотность состояний с энергией E. В 1904 г. Эйнштейн вывел формулу [27]) для среднего квадрата энергии флуктуаций первой системы:

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = \langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2. \qquad (4.12)$$

Продифференцировав уравнение (4.11) по β, он получил

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = -\partial \langle E \rangle / \partial \beta = kT^2 \partial \langle E \rangle / \partial T. \qquad (4.13)$$

Величина $\langle \varepsilon^2 \rangle$, как отметил Эйнштейн, является мерой тепловой устойчивости системы. Чем значительнее флуктуации, тем меньше степень устойчивости системы. «Таким образом, абсолютная постоянная [28]) k определяет тепловую стабильность системы. Уравнение (4.13) представляет интерес потому, что оно уже не содержит ни одной величины, напоминающей о предположениях, положенных в основу теории» [E12].

Затем Эйнштейн ввел критерий значительности флуктуаций:

$$\xi = \langle \varepsilon^2 \rangle / \langle E \rangle^2 \approx 1. \qquad (4.14)$$

Классический идеальный газ при нормальных условиях не удовлетворяет этому соотношению, так как для него $\langle E \rangle = nkT/2$ (n — число частиц), в результате чего $\xi = O(n^{-1})$ вне зависимости от объема. Здесь он отмечает, что ξ может быть порядка единицы только для излучения черного тела. В этом случае по закону Стефана — Больцмана $\langle E \rangle = aVT^4$ (V — объем, a — константа), откуда, следовательно, получаем, что $\xi = 4k/aVT^3$. Температура T пропорциональна величине, обратной λ_{max}, где λ_{max} — длина волны, при которой спектральное излучение достигает максимума. Из этого Эйнштейн сделал вывод, что важную роль играет зависимость ξ от объема: для фиксированной температуры T значение ξ может стать большим в том случае, когда велико отношение λ_{max}^3/V, т. е. мало значение V [29]). Отсюда он заключил, что «флуктуации энергии реализуются в физических системах одного-единственного типа» — в излучении.

Изложенное выше заслуживает двух комментариев. Первое: вывод неверен. Рассмотрим излучение, состоящее из n мод. Тогда $\langle E \rangle = aVT^4 = nkT$, в результате чего вновь $\xi = O(n^{-1})$. В классической теории (которой Эйнштейн, естественно, пользовался в 1904 г.) флуктуации энергии, таким образом, не так уж различаются для излучения и идеального газа. Второе: этот подход имел огромное значение для работы Эйнштейна 1905 г., так как он привлек его внимание к зависимости термодинамических величин от объема, зависимости, сыгравшей решающую роль при формулировании гипотезы световых квантов в следующей его статье.

---

[27]) См. уравнение (198) в книге Гиббса [G1].

[28]) Эйнштейн использовал не k, а другой символ.

[29]) Для $\xi = 1$ получаем $V^{1/3} \approx 0{,}4/T$ и $\lambda_{max} \approx 0{,}3/T$. Эйнштейн был удовлетворен такой близостью результатов.

Как бы то ни было, в 1904 г. Эйнштейн уже сделал смелый шаг вперед (и понимал это): он применил статистической подход к излучению [30]). В 1905 г. он проделал это еще раз. В 1909 г. уравнение (4.13) вновь стало для него отправным пунктом и привело к осознанию корпускулярно-волнового дуализма электромагнитного излучения. В 1925 г. другое выражение, тесно связанное с уравнением (4.13), помогло ему понять, что такой же дуализм должен иметь место и для вещества. Эти вопросы будут подробно обсуждаться в ч. VI. А пока — два заключительных комментария к уравнению (4.13). Когда Эйнштейн получил его, он не знал, что Гиббс его опередил [G1, гл. 7]. Это уравнение — наиболее важный и единственный запоминающийся результат, полученный Эйнштейном до 1905 г.

В мае 1905 г. Эйнштейн вновь занялся флуктуациями (хотя и в другом роде) в работе, посвященной броуновскому движению, о чем речь пойдет в гл. 5. В этой главе говорится также об отношении Эйнштейна к статистической физике в 1905 г. и в последующие годы.

§ 4.4. Эйнштейн и принцип Больцмана

Я уже подчеркивал, что почти все сделанное Эйнштейном в квантовой теории по сути связано со статистикой. Соответственно большинство его наиболее важных замечаний по принципам статистической механики содержится в работах по квантовой физике. Наиболее яркий пример — статья 1905 г. о световых квантах [E13]. Две с половиной из семнадцати страниц посвящены фотоэффекту, девять — статистическим и термодинамическим вопросам. В этой статье, в которой, кстати, впервые встречается термин *принцип Больцмана*, содержится критика статистического метода Больцмана.

С 1905 по 1920 г. Эйнштейн неоднократно выражал неудовольствие по поводу толкования вероятности другими. В 1905 г. он писал: «Слово „вероятность“ часто употребляется в смысле, не совпадающем с определением, даваемым ему в теории вероятностей. Особенно часто предполагается „случай равной вероятности“ там, где с теоретической стороны задача является достаточно определенной, чтобы не вводить гипотез и рассуждать по дедукции» [E13]. К этому времени Эйнштейн независимо пришел к первому определению Больцмана, и можно с уверенностью предположить, что он имел в виду подсчет комплексий. Он не только считал это определение искусственным, но и полагал, что в данном подсчете вообще нет необходимости: «Я надеюсь тем самым устранить логическую трудность, еще стоящую на пути применения принципа Больцмана» [E13]. Для иллюстрации своей идеи он дал новый вывод хорошо известной к тому

[30]) Рэлей поступил так раньше (см. § 19.2), но я не думаю, что Эйнштейн знал об этом в 1904 г.

времени формулы изменения энтропии S идеального газа при изотермическом обратимом изменении объема от V_0 до V:

$$S(V, T) - S(V_0, T) = (R/N)\ln(V/V_0)^n, \qquad (4.15)$$

где R — универсальная газовая постоянная, N — постоянная Авогадро, n — число молекул в газе. Как мы увидим дальше, уравнение (4.15) сыграло исключительно важную роль в открытии Эйнштейном световых квантов. (Чтобы избежать возможных недоразумений, напоминаю читателям, что это соотношение не имеет ничего общего с тонкостями статистической механики, так как представляет собой прямое следствие второго закона для обратимых процессов и законов идеального газа [31].) Эйнштейн вывел уравнение (4.15), использовав следующий подход. Из принципа Больцмана [см. (4.3)], который он записал в виде

$$S = (R/N)\ln W + \text{const} \qquad (4.17)$$

(лишь начиная с 1909 г., Эйнштейн вместо R/N стал употреблять k), следует, что обратимый переход из состояния a в состояние b удовлетворяет соотношению

$$S^a - S^b = (R/N)\ln(W^a/W^b). \qquad (4.18)$$

Пусть система состоит из 1, 2, ... подсистем, которые не взаимодействуют друг с другом и, следовательно, статистически независимы. Тогда

$$W = W_1 W_2 \ldots, \qquad (4.19)$$

$$S^a - S^b = (R/N)\ln\left[(W_1^a/W_1^b)(W_2^a/W_2^b)\ldots\right].$$

Для идеального газа подсистемами можно считать отдельные молекулы. Пусть газ в состояниях a и b имеет соответственно объем и температуру (V, T) и (V_0, T). Далее Эйнштейн дает свое определение вероятности: «*Очевидно* (курсив мой. — *А. П.*), для этой вероятности $[W^a/W^b]$, являющейся „статистической вероятностью", получается значение»

$$W^a/W^b = (V/V_0)^n. \qquad (4.20)$$

Уравнения (4.17) и (4.20) снова приводят к (4.15).

---

[31]) Для бесконечно малого обратимого изменения второй закон можно записать в виде (p — давление)

$$T\,dS = c_v dT + (\partial U/\partial V + p)\,dV, \qquad (4.16)$$

где c_v (удельная теплоемкость при постоянном объеме), S, а также внутренняя энергия U являются в общем случае функциями V и T. Из выражения $\partial(\partial S/\partial V)/\partial T = \partial(\partial S/\partial T)/\partial V$ и из уравнения (4.16) следует

$$\partial p/\partial T - (p + \partial U/\partial V)/T = 0.$$

Для классического идеального газа последнее соотношение приводится к виду $\partial U/\partial V = 0$, так как в этом случае $NpV = nRT$. В свою очередь, условие $\partial U/\partial V = 0$ предполагает, что c_v — функция только T. (На самом деле для идеального газа c_v не зависит и от T, но здесь это неважно.) Следовательно, $T\,dS(V, T) = c_v(T)dT + nRT\,dV/NV$. Для конечного обратимого изменения интегрирование по объему дает уравнение (4.15).

Конечно, уравнение (4.20) получается также из формулы Больцмана [см. (4.8)], так что каждый из множителей ω_A можно выбрать пропорциональным V (для всех A). Поэтому (4.8) можно записать в виде величины $W = V^n$, умноженной на коэффициент подсчета комплексий, один и тот же для состояний a и b. Таким образом, Эйнштейн был прав, говоря, что уравнение (4.15), а следовательно, и закон для идеального газа, вытекающий из уравнений (4.15) и (4.16), можно получить и без подсчета комплексий. «В специальной работе я покажу, что при рассмотрении тепловых процессов вполне достаточно исходить из так называемой статистической вероятности»,— заявил Эйнштейн [E13]. Пожалуй, он был настроен чересчур оптимистично. Уравнение (4.8) приводит к гораздо более значительным результатам, чем (4.15). Ни один физик не станет отрицать, что вероятность нахождения n статистически независимых частиц в подобъеме V объема V_0 с очевидностью равна $(V/V_0)^n$. Однако подсчет комплексий дает больше информации, а именно позволяет получить распределение Максвелла — Больцмана. Неудивительно, что обещанная статья так никогда и не была написана.

Но Эйнштейн по-прежнему критиковал понятие комплексий. Вот что он писал в 1910 г.: «Обычно W приравнивается к числу разных возможных способов (комплексий)... Для вычисления W необходима *законченная* (например, молекулярно-кинетическая) теория рассматриваемой системы. Поэтому кажется сомнительным, допустимо ли при таком подходе придавать какой-либо смысл принципу Больцмана *самому по себе*, т. е. без *законченной* молекулярно-механической или иной элементарной теории, которая бы полностью описывала элементарные процессы. Соотношение [(4.3)], не дополненное элементарной теорией или, иначе говоря, рассматриваемое с феноменологической точки зрения, выглядит бессодержательным» [E29].

Насколько я понимаю, в 1910 г. Эйнштейн еще не представлял себе, как метод комплексий может быть распространен с идеального газа на реальный [32]). Верно, что при наличии молекулярных сил не существует таких простых и однозначных формул, как уравнения (4.5) и (4.8). В принципе это можно сделать и для реального газа, использовав крупнозернистый микроканонический ансамбль Гиббса, но с этим методом Эйнштейн, видимо, в то время еще не был знаком.

После 1910 г. критика статистического метода в статьях Эйнштейна больше не встречается. О его отношении к этой проблеме можно судить по более поздним высказываниям о Больцмане и Гиббсе. В 1915 г. он писал о Больцмане: «[Его] рассуждение [о втором законе] выглядит довольно пространным и утонченным. Но изящество и важность обсуждаемого предмета послужат достойной наградой за усилия ума» [E43]. О Гиббсе в 1918 г. он

---

[32]) Гиббс в принципе решил и эту проблему в своей книге [G1].— *Примеч. ред.*

сказал: «Его книга — это... шедевр, хотя она воспринимается с трудом и о главном приходится догадываться, читая между строк» [E42]. За год до смерти Эйнштейн удостоил Гиббса наивысшей похвалы. На вопрос, кого он считает величайшим из ученых, крупнейшим мыслителем из всех, кого он знал, Эйнштейн ответил: «Лоренца» и добавил: «Я никогда не встречался с Уиллардом Гиббсом; если бы нам довелось встретиться, то, возможно, я поставил бы его в один ряд с Лоренцем» [D1].

В конце § 4.1 я упоминал, что Эйнштейн предпочитал рассматривать вероятность феноменологически, не прибегая к статистической механике. Постараюсь пояснить, что он при этом имел в виду. С самого начала следует подчеркнуть, что для Эйнштейна принцип Больцмана был также священен, как закон сохранения энергии [E49]. Однако неудовольствие, вызванное тем, как другие толковали понятие вероятности, заставило его по-другому, совершенно по-своему подойти к связи между S и W. Он предлагал переходить не от микроскопического подхода к макроскопическому, а, скорее, наоборот. Там, где Больцман начинал с вероятности, чтобы прийти к выражению для энтропии, Эйнштейн предлагал использовать феноменологическую информацию об энтропии, чтобы узнать, какой должна быть вероятность.

Для иллюстрации такого подхода, которым он пользовался с большим успехом, приведу типичный пример, взятый из одной из наиболее важных его статей по квантовой физике. Речь идет об уравнении для флуктуаций (4.13), выведенном Эйнштейном независимо от Гиббса, но по сути тем же методом. В 1909 г. Эйнштейн дал новый вывод, на этот раз оригинальный [E24]. Рассмотрим большую систему объема V, находящуюся в равновесии при температуре T. Разделим V на малый подобъем V_0 и оставшуюся часть V_1, где $V = V_0 + V_1$, $V_0 \ll V_1$. Фиксированная полная энергия распределяется аналогично: $E = E_0 + E_1$. *Допустим*[33]), что энтропия также является аддитивной величиной:

$$S = S_0 + S_1. \tag{4.21}$$

Предположим далее, что E_0, E_1 отличаются от равновесных значений на ΔE_0 и ΔE_1 соответственно. Тогда

$$\Delta S = [\partial S_0/\partial E_0]\,\Delta E_0 + [\partial S_1/\partial E_1]\,\Delta E_1 + \\ + (1/2)\left[\partial^2 S_0/\partial E_0^2\right](\Delta E_0)^2 + (1/2)\left[\partial^2 S_1/\partial E_1^2\right](\Delta E_1)^2 + \ldots, \tag{4.22}$$

где выражения в квадратных скобках относятся к равновесным значениям. Члены первого порядка сокращаются, так как $\Delta E_0 = -\Delta E_1$ (из закона сохранения энергии) и $[\partial S_0/\partial E_0] = [\partial S_1/\partial E_1]$ (в равновесии). Более того, $\left[\partial^2 S_0/\partial E_0^2\right] = -1/c_0 T^2$ и $\left[\partial^2 S_1/\partial E_1^2\right] = -1/c_1 T^2$, где c_0, c_1 — теплоемкости при постоянном объеме,

---

[33]) Позднее в течение непродолжительного времени это предположение оспаривалось (§ 21.1).

а $c_1 \gg c_0$, так как $V_1 \gg V_0$. Таким образом, уравнение (4.22) приводится к виду

$$\Delta S = \Delta S_0 = -(\Delta E_0)^2/2c_0T^2. \qquad (4.23)$$

Затем Эйнштейн применил к подсистеме соотношение $S_0 = k \ln W_0$ и истолковал это уравнение таким образом, что W_0 есть вероятность данной подсистемы иметь (в любой заданный момент времени) энтропию S_0. Отсюда

$$W_0 = \overline{W}_0 \exp(\Delta S/k), \qquad (4.24)$$

где $\overline{W}_0$ — равновесное значение W_0. Уравнения (4.22) и (4.24) показывают, что W_0 в ΔE_0 подчиняется распределению Гаусса. Обозначим, как и ранее, средний квадрат отклонения для этого распределения $\langle \varepsilon^2 \rangle$. Тогда $\langle \varepsilon^2 \rangle = kc_0T^2$, т. е. вновь получаем уравнение (4.13).

Теперь нам понятно (в начале XX в. это было отнюдь не очевидно), что физики, занимавшиеся основами статистической механики, должны были одновременно решать две задачи. До 1913 г.— до появления модели атома Бора — вся информация о квантовых явлениях поступала либо из исследования процесса излучения черного тела, либо из рассмотрения проблем теории удельной теплоемкости. И в том, и в другом случае решающую роль играет статистический подход. Таким образом, борьба за лучшее понимание принципов классической статистической механики сопровождалась постепенным осознанием того, что квантовые эффекты требуют новой механики и, следовательно, новой статистической механики. Насколько трудно было разделить эти две задачи, можно судить по замечанию Эйнштейна, сделанному в 1909 г. В очередной раз сокрушаясь по поводу комплексий, он отмечает: «Ни Больцман, ни Планк не давали определения W» [E24]. К тому времени, когда писались эти слова, Больцмана, представителя классической физики, уже не было в живых. Планк, первый представитель квантовой физики, возвестил новую эру в теоретической физике XX в., введя новый метод подсчета комплексий, не имевший под собой абсолютно никакого логического обоснования, но позволявший получить искомый результат[34]). Ни Эйнштейн, глубоко уважавший, но в то же время критиковавший научные взгляды этих ученых, ни кто-либо другой не мог представить себе в далеком 1909 г., насколько странным будет казаться в конце XX в. упоминание рядом, в одной фразе имен Больцмана и Планка.

Подводя итог, можно сказать, что работы Эйнштейна по статистической механике до 1905 г. достойны упоминания, во-первых, из-за вывода формулы флуктуаций энергии и, во-вторых, вследствие указания на зависимость термодинамических параметров от объема, сыгравшую столь важную роль при открытии

[34]) Метод подсчета Планка обсуждается в § 19.1.

им световых квантов. Эйнштейн независимо от Больцмана дал определение вероятности (совпадающее с первым больцмановским) через время пребывания в данном состоянии. Возможно, замена «логики Больцмана» ($W \to S$) «логикой Эйнштейна» ($S \to W$) была вызвана критическим отношением Эйнштейна ко второму определению Больцмана. Имевшее огромное значение применение идей Эйнштейна к проблеме теоретического определения постоянной Больцмана было обусловлено именно озабоченностью Эйнштейна отсутствием теоретического обоснования статистической механики. Об этих идеях будет рассказано в следующей главе, где мы встретимся с Эйнштейном в 1905 г., в пору бурного расцвета его научной деятельности. Возможно, одной из причин такого взрыва творческой активности было чувство освобождения, которое он испытал, покинув насыщенную математикой область фундаментальных исследований, не вполне соответствовавшую его научному темпераменту.

Глава 5. РЕАЛЬНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ МОЛЕКУЛ

§ 5.1. Кратко о XIX столетии

Химия. В 1771 г. была завершена работа над первым изданием Британской энциклопедии, «Словаря искусств и наук, составленного по новому плану... Обществом шотландских джентльменов». Статья «Атом», написанная Уильямом Смелли, который прославился пристрастием к наукам и виски [K1], гласила: «*Атом.* В философии, частица материи столь малая, что не допускает дальнейшего деления. Атомы являются *minima naturae* [мельчайшими телами] и считаются первичными элементами или основными составляющими всех физических субстанций». Демокрит мог бы не согласиться с этим определением, так как для него атомы не обязательно являлись мельчайшими телами. Эпикур мог бы возразить, что атом имеет структуру, хотя его и нельзя разделить на части физическим воздействием. Оба этих мудреца могли бы счесть определение неполным, так как полагали, что атомы существуют в бесконечном разнообразии размеров и форм, причем ни одна из разновидностей атомов никогда не превратится в другую. Их удивило бы, что не упоминается πρωτυλη, первичная материя, из которой состоят все атомы. Весьма вероятно, что этот воображаемый диалог древнегреческих мыслителей с философами конца XVIII в. довольно быстро привел бы к полному взаимопониманию, настолько мало изменились за разделявшие их две тысячи лет представления о строении вещества.

Резкие перемены начались в 1808 г., когда Джон Дальтон приступил к публикации своей «Новой системы химической философии» [D1]. Это событие знаменует рождение современной химии, в соответствии с которой все виды вещества могут быть све-

дены к конечному числу типов атомов (к тому времени было известно 18 элементов). Оценка, данная Дальтоном в 1810 г. самой молодой из наук, звучит очень злободневно: «Я склонен полагать, что может существовать значительное число объектов, заслуживающих названия элементарных, которые мы никоим образом не в силах заставить превращаться друг в друга. Следует, однако, прибегать к любым мерам для сведения к минимуму числа таких тел или элементов, ведь, помимо всего прочего, мы можем и не подозревать, какие из элементов совершенно неразложимы, а какие пока просто не поддаются разложению из-за того, что в нашем распоряжении нет соответствующих средств. Нам удалось, тем не менее, установить, что все *атомы одного и того же вида*, простые или составные, должны по необходимости считаться одинаковыми по форме, весу и прочим отличительным характеристикам» [В1, с. 8]. Заметим, что составные атомы Дальтона — это то, что мы сейчас называем молекулами. Такая грандиозная путаница в терминологии царила в течение большей части XIX в.; то, что один считал атомами, другой называл молекулами. Конечно, потребность в общем языке назревала, но довольно медленно. Спустя 50 лет на первой в истории международной научной конференции — состоявшемся в 1860 г. в Карлсруэ химическом конгрессе [1]) — руководящий комитет по-прежнему считал необходимым включить в повестку дня в качестве первоочередного вопрос о том, «...следует ли проводить различие между выражениями *молекула* и *атом*? При этом имеется в виду, что молекулами называются мельчайшие части тел, которые могут вступать в химические реакции и быть сравнимы друг с другом по физическим свойствам, а атомами называются мельчайшие части тел, входящие в состав молекул» [М1]. Еще интереснее, чем наличие в повестке дня такого пункта, то, что даже в 1860 г. к единому мнению прийти так и не удалось.

Лучше всего понять состояние дел в науке XIX в. помогают вопросы, затронутые молодым ученым Августом Кекуле фон Штрадоницем (который к тому времени уже установил, что атомы углерода четырехвалентны) в его вступительной речи на конгрессе в Карлсруэ. «[Он] говорил о разнице между физической и химической молекулами и об отличии их от атомов. Физическая молекула,— сказал он,— есть частица рассматриваемого газа, жидкого или твердого тела. Химическая молекула — это мельчайшая часть тела, вступающая в химическую реакцию или представляющая собой ее продукт. Она не является неделимой. Атомы же есть частицы, не поддающиеся дальнейшему делению» [М1]. И физики, и химики могли бы почерпнуть много полезного, если бы они с бо́льшим вниманием отнеслись к замечанию, сделанному Станислао Канниццаро в дискуссии по докладу Кекуле о том,

[1]) Встреча проходила с 3 по 5 сентября 1860 г. В ней принимали участие 127 химиков из Австрии, Бельгии, Франции, Германии, Великобритании, Италии, Мексики, Польши, России, Испании, Швеции и Швейцарии.

что различие между физическими и химическими молекулами не имеет экспериментальной основы и представляется поэтому надуманным. Одним из самых примечательных явлений науки XIX в. были поразительные противоречия, возникавшие в спорах об атомах и молекулах между физиками и химиками, когда они вообще снисходили до общения друг с другом. Это отнюдь не означает, что имелась одна общая точка зрения у всех химиков и другая — у всех физиков. Ничего подобного, в каждом лагере было множество часто противоречивых мнений, на которых здесь нет нужды останавливаться подробно. Достаточно привести несколько типичных примеров и указать главную тему. Химики спорили о том, являются ли атомы реальными объектами или же они — просто удобный способ записи химических правил и законов. Физики в основном обсуждали кинетическую теорию газов, в частности смысл второго закона термодинамики.

Проиллюстрировать расхождения во взглядах между химиками и физиками можно на примере суждения Дальтона о работе Жозефа Луи Гей-Люссака. Химия Дальтона базировалась на его законе множественных соотношений: если имеется соединение, состоящее из двух элементов, то отношение веса одного элемента к весу другого элемента, находящегося в связи с ним, всегда есть целое число. Как уже упоминалось, публикация основного труда Дальтона началась в 1808 г. В 1809 г. Гей-Люссак опубликовал свой закон объемных отношений: объемы газов, вступающих в реакции, находятся в простых отношениях друг к другу, т. е. в отношениях целых чисел. Гей-Люссак отметил, что его результаты согласуются с атомной теорией Дальтона [G1]. Дальтон же не поверил Гей-Люссаку: «Его представление об объемах аналогично моему представлению об атомах, и если бы можно было доказать, что все упругие флюиды имеют в одинаковых объемах равное число атомов или числа, относящиеся как 1, 2, 3 и т. д., то обе гипотезы стали бы одной с тем различием, что моя гипотеза универсальна, а его применима только к упругим флюидам. Гей-Люссак не мог не видеть, что подобная гипотеза была развита мною и отброшена как невыдержавшая критики...» [D1, т. 1, ч. 2, прил.]. (Упругие флюиды в современной терминологии — просто газы.) Кроме того, Дальтон не принял гипотезы, высказанной в 1811 г. Амедео Авогадро: при заданных температуре и давлении одинаковые объемы газов содержат одинаковое число молекул [A1][2]). Нельзя сказать, что Дальтон был одинок или что его заблуждение было кратковременным. По общему мнению, кульминацией конгресса в Карлсруэ было выступление Канниццаро, в котором ему по-прежнему пришлось подчеркивать важность применения в химии закона Авогадро[3]). На

[2]) Дальтон (в отличие от Авогадро) не понимал, что мельчайшими частицами газа могут быть не только атомы, но и молекулы.

[3]) Со взглядами этого замечательного ученого можно познакомиться по переводу на английский его статьи 1858 г., опубликованному в 1961 г. [C1].

этом конгрессе химикам не сразу удалось прийти к единой точке зрения. «Вероятно, ученые старшего поколения были оскорблены запальчивостью и покровительственным отношением со стороны молодежи» [M2]. Однако, как вспоминал через 30 лет Дмитрий Иванович Менделеев, «после конференции закон Авогадро получил широкое признание и вскоре завоевал все умы» [M3].

Закон Авогадро — старейший из физико-химических законов, полученных на основе явного допущения реальности существования молекул. Опоздание, с которым его признали химики, недвусмысленно показывает, насколько распространенным было сопротивление представлению о реальности существования молекул. Интересующихся подробностями дебатов химиков на эту тему отсылаю к вышедшим недавно прекрасным монографиям [B1, с. 8; N1]. Здесь я приведу лишь несколько красноречивых замечаний Александра Уильямсона, убежденного атомиста. В своей председательской речи на заседании Лондонского химического общества в 1869 г. он сказал: «Иногда авторитетные химики публично заявляют о том, что они с радостью отказались бы от атомной теории и что они стыдятся пользоваться ею. Они рассматривают ее как нечто чужеродное общему направлению развития химии и считают, что наша наука лишь выиграла бы от отказа пользоваться этой теорией... С одной стороны, все химики пользуются атомной теорией... с другой стороны, значительное число ученых относится к ней с недоверием, а некоторые с откровенной неприязнью. Если теория действительно не нужна или так несовершенна, как им представляется, давайте беспристрастно изложим ее и рассмотрим ее недостатки. Попробуем их устранить или же отвергнем эту теорию и заменим другой, если ее несовершенства действительно так серьезны и неустранимы, как то следует из насмешек гонителей» [W1].

В заключение этого обзора положения дел в химии XIX столетия следует отметить один важный результат, полученный в то время и связанный с атомной теорией. В 1815 г. Уильям Праут, лондонский врач, интересовавшийся химией, анонимно опубликовал статью, в которой доказывал, что удельные веса элементов могут быть выражены как кратные целые некой фундаментальной единицы [P1]. В следующем году он вновь анонимно опубликовал дополнение к статье [P2], где указал, что за такую фундаментальную единицу может быть принят удельный вес водорода: «Фактически можно полагать, что πρωτυλη [первичной материей] древних является водород». Тем не менее, Праут не считал свою гипотезу доводом в пользу существования атомов: «Я привык относиться к ней [к атомной теории] совершенно так же, как, по-моему, большинство ботаников относится к системе Линнея, а именно, как к удобному искусственному приему, который имеет массу применений, но никак не связан с природой» [B2].

Кинетическая теория. Догадка о том, что газы состоят из дискретных частиц, была впервые высказана еще в XVIII в. Пер-

вым предположил, что давление газа вызывается соударениями составляющих его частиц со стенками сосуда, видимо, Даниил Бернулли [B3]. Корифеями кинетической теории XIX в. были — можно сказать, по определению — атомисты. В статье Клаузиуса 1857 г. «О типе движения, называемого теплотой» [C2] различие между твердыми телами, жидкостями и газами связывается с разными типами молекулярного движения. В 1873 г. Максвелл писал: «Хотя во глубине веков происходили неисчислимые катастрофы, а на небесах они, возможно, происходят и сейчас, хотя разрушались существовавшие с древности системы и из их руин возрождались новые, молекулы [т. е. атомы!], из которых сложены эти системы [Земля и вся Солнечная система],— элементарные кирпичики мироздания — остаются нерушимыми и вечными. Они существуют по сей день в том виде, как были некогда созданы — совершенными по числу, и мере, и весу...» [M4, с. 376—377] [4]).

Больцман высказывался менее категорично, скорее даже сдержанно, но вряд ли ему удалось бы обосновать второй закон, если бы он не верил в корпускулярное строение вещества. Его утверждение о том, что энтропия растет не всегда, а почти всегда, действительно с трудом усваивали те, кто не верил в реальность существования молекул. Планк, бывший в те времена отъявленным скептиком, ясно понимал это и писал в 1883 г.: «Последовательное применение второго закона [по Планку, признание роста энтропии в качестве абсолютного закона] ... несовместимо с предположением о существовании атомов конечного размера. Следует ожидать, что в ходе дальнейшей разработки этой теории произойдет столкновение двух гипотез, которое будет стоить жизни одной из них» [P3]. В 1895 г. к этой битве идей присоединился Оствальд. Выступая перед Немецким обществом любителей природы и искусств, он сказал: «Предположение о том, что все явления природы могут быть в конечном счете сведены к механическим процессам, нельзя принимать даже в качестве полезной рабочей гипотезы, это просто-напросто ошибка. Ошибочность этого предположения можно проиллюстрировать таким фактом. Все уравнения механики допускают обращение знака времени для зависящих от времени величин. Это означает, что процессы, полностью описываемые уравнениями механики, могут с одинаковой легкостью протекать в обоих временных направлениях. Таким образом, в чисто механическом мире не может быть „до“ и „после“, как в мире, где мы живем; иначе дерево могло бы превратиться в побег, а затем в семя, бабочка — в гусеницу, старик — в ребенка. Механистическая доктрина никак не объясняет тот факт, что на самом деле этого не происходит, да такое объяс-

[4]) Фарадей делал оговорки. В 1844 г. он написал: «Атомная доктрина... есть в лучшем случае лишь предположение, об истинности которого мы судить не в состоянии, что бы ни говорилось и ни мыслилось о степени ее правдоподобности» [W2].

пение и не может быть дано ввиду некоторых фундаментальных свойств уравнений механики. Фактическая необратимость явлений природы доказывает, таким образом, наличие процессов, которые нельзя описать уравнениями механики. Тем самым выносится приговор научному материализму» [O1]. По сути, это перефразирование аргумента, выдвинутого за 20 лет до этого Лошмидтом.

С такого вот рода высказываниями приходилось бороться Больцману, также присутствовавшему на этом заседании. Нам повезло, так как в нашем распоряжении имеется свидетельство очевидца, молодого физика Арнольда Зоммерфельда, бывшего на этом заседании и записавшего ход дальнейшей дискуссии. «Доклад по „Энергетизму" зачитывал Гельм из Дрездена [5]), за ним стоял Вильгельм Оствальд, а за ними обоими — философия Эрнста Маха, не присутствовавшего на заседании. Оппонентом был Больцман, которого поддерживал Феликс Клейн. Как по форме, так и по содержанию битва Больцмана с Оствальдом напоминала битву быка с увертливым тореадором. Однако на этот раз, несмотря на искусство тореро, победу одержал бык. Аргументы Больцмана взяли верх. Мы, молодые математики, были тогда поголовно на стороне Больцмана; нам представлялось совершенно ясным, что абсолютно невозможно вывести уравнения движения даже для одной материальной точки, не говоря уж о системе со многими степенями свободы, из единственного уравнения для энергии...» [S1]. Что касается позиции Эрнста Маха, то она была антиатомистической, но гораздо более здравой, чем позиция Оствальда: «В физическую науку не укладывается представление о самовозникающих, изменяющихся, экономных инструментах исследования — молекулах и атомах — как о реально существующих явлениях... Атом должен оставаться инструментом... как функция в математике» [M5].

Задолго до того, как проходили эти высокоученые дискуссии fin de siècle [6]), за много лет до установления законов термодинамики, стали предприниматься теоретические попытки оценить размеры молекул. Еще в 1816 г. Томас Юнг заявил, что «диаметр или размер молекул воды лежит в пределах от двух до десяти тысяч миллионных частей дюйма» [Y1] [7]). В 1866 г. Лошмидт рассчитал диаметр молекул воздуха и заключил, что «для атомов и молекул приемлемая мера длины составляет порядка миллион-

---

[5]) Физик Георг Гельм был ярым сторонником «энергетизма» Оствальда, в соответствии с которым молекулы и атомы есть лишь математическая фикция, а основной физической реальностью является энергия во всех ее проявлениях.

[6]) Буквально «конца века», в переносном значении «упадочные», «декадентские» (*фр.*).— *Примеч. пер.*

[7]) Юнг получил этот результат, использовав не совсем ясный подход, при котором сила поверхностного натяжения связывалась с пределом действия молекулярных сил, после чего этот предел приравнивался к диаметру молекул. Рэлей, а с ним и многие другие, указывали на трудности понимания такого подхода [R1].

ной доли миллиметра» [L1]. Четыре года спустя Кельвин, считавший «установленным научным фактом, что газ состоит из движущихся молекул», нашел, что «диаметр молекулы газа не может быть менее $2 \cdot 10^{-9}$ см» [T1]. В 1873 г. Максвелл установил, что диаметр молекулы водорода около $6 \cdot 10^{-8}$ см [M4, с. 361]. В том же году Иоханнес Дидерик Ван-дер-Ваальс в своей докторской диссертации получил такие же результаты [W3]. К 1890 г. разброс этих значений, а также результатов, полученных другими [B4, т. 1, гл. 1], заметно уменьшился. К концу 80-х годов прошлого века было установлено, что радиусы молекул водорода и воздуха находятся в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-8}$ см [R2] — это довольно неплохой результат. Некоторые из упомянутых физиков использовали различные методы определения постоянной Авогадро N, числа молекул в моле. Например, расчеты Лошмидта в 1866 г. привели к результату $N \approx 0{,}5 \cdot 10^{23}$ [L1], Максвелл получил $N \approx 4 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ [M4, с. 361].

Наиболее точное известное сейчас значение (с точностью до трех знаков) равно [D2]:

$$N \approx 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \qquad (5.1)$$

К концу XIX в. оценка значения N колебалась от 10^{22} до 10^{24} моль$^{-1}$ — прекрасное достижение, если принять во внимание приближенность моделей и применяемых методов, которую подчеркивали все, кто работал над этой проблемой.

Здесь не место рассматривать те либо туманные, либо блестящие физические идеи, авторы которых вторгались в неизведанные области. Однако для работы Лошмидта [L1] можно сделать исключение, так как она содержит один характерный элемент, который, как мы вскоре увидим, вновь появляется в статьях Эйнштейна 1905 г., посвященных определению радиуса молекул и постоянной Авогадро[8]). Имеется в виду использование системы двух уравнений с двумя неизвестными (N и диаметра молекул d), выраженными через известные физические величины.

В первом уравнении Лошмидт устанавливает соотношение между d, средней длиной свободного пробега λ и числом упругих сферических молекул n на единицу объема газа: $\lambda n \pi d^2$ равно расчетной константе[9]). Во втором уравнении присутствует величина $n\pi d^3/6$ — часть объема, занимаемая молекулами. Предположим, что в жидкой фазе частицы плотно упакованы. Тогда $n\pi d^3/6 = \rho_{\text{газ}}/1{,}17\rho_{\text{жидк}}$, где ρ — плотности вещества в соответствующих фазах, а геометрический параметр 1,17 был получен Лошмидтом в качестве отношения объемов молекул в жидкой

---

[8]) Речь идет о работах [E5, E8].— *Примеч. пер.*

[9]) Это соотношение было получено Клаузиусом и Максвеллом. Расчетная константа равна $1/\sqrt{2}$, если использовать распределение Максвелла для скоростей идентичных молекул. Лошмидт подставлял значение 3/4, полученное Клаузиусом для случая, когда у молекул газа предполагается одинаковая скорость. Ссылки на работы, уточнявшие расчеты Лошмидта, приведены в [T2].

и газообразной фазах. Итак, имеем два уравнения для n (и, следовательно, для N) и d. (Лошмидт проводил свой расчет для воздуха, где λ было известно из эксперимента. Однако для определения плотности кислорода и азота в жидкой фазе ему пришлось прибегнуть к косвенным теоретическим оценкам.)

В общем неудивительно, что представление о реальности существования молекул в физике наталкивалось на меньшее сопротивление, чем в химии. Как видно на примере расчетов Лошмидта 1866 г., физики уже практически могли что-то делать на основе гипотезы молекул, в то время как химикам в большинстве случаев было практически все равно, действительно ли существуют молекулы или же они служат для условного описания реальности. Однако даже химикам становилось все труднее отрицать существование молекул, в особенности после 1874 г., когда Якоб Хендрик Вант-Гофф и независимо от него Жозеф Ашиль ле Бель объяснили изомерию некоторых органических веществ на основе стереохимических свойств углеродных соединений. Скептики не сразу сдали позиции (даже сам Вант-Гофф сначала весьма осторожно высказывался по этому вопросу [N1, с. 4]), но в 80-е годы прошлого века правильность молекулярной теории была признана почти всеми.

Чтобы завершить обзор тех вопросов, которые стояли перед учеными, решавшими, существуют ли молекулы, до того как этой проблемой занялся Эйнштейн, необходимо сделать еще два замечания.

Конец неделимости. До самого конца XIX в. подавляющее большинство физиков, веривших в существование атомов, разделяло мнение Максвелла о том, что эти частицы нерушимы и вечны. «Они ... единственные материальные тела, всегда остающиеся в точности в том же состоянии, что и в момент своего творения»,— писал он в книге «Теория теплоты» [M6], наиболее полно отражавшей его кредо в отношении атомистики [10]). Правда, многие из этих физиков (и среди них Максвелл) были убеждены, что внутри атома что-то должно «греметь», иначе как же объяснить наличие атомных спектров? Поэтому, хотя и ощущалась потребность в представлении атома как тела, имеющего структуру, это (как тогда представлялось) не означало, что атом может быть расщеплен. Однако в 1899 г., через два года после того, как Джозеф Джон Томсон открыл электрон, он объявил о том, что атом расщепляется: «Электризация [т. е. ионизация] с необходимостью требует расщепления атома, при этом часть массы атома высвобождается и отделяется от него» [T3]. К тому времени все яснее становилось, что радиоактивные явления (открытые в 1896 г.) также нужно было объяснять, исходя из предположения о делимости атомов. «Атомы [радиоактивных элементов], неделимые с точки зрения химии, в данном случае оказываются

[10]) Для Максвелла электролитическая диссоциация не противоречила представлениям о неделимости атомов. Но это уже совсем другая история.

делимыми»,— писала Мария Кюри в 1900 г. [C3]. Кроме того, она отметила, что объяснение процесса радиоактивности через выброс субатомных частиц «серьезно подрывает основы химии». В 1902 г. Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди предложили теорию превращений; в соответствии с ней радиоактивные тела содержат нестабильные атомы, часть которых за определенное время распадается. Через 40 лет очевидец так описывал события того времени: «Молодому физику или химику трудно даже вообразить, насколько смелой и неприемлемой была [теория превращений] для атомистов того времени» [R3].

Итак, на рубеже двух столетий классические атомисты, те, кто одновременно верил в существование атомов и в их неделимость, оказались меж двух огней. Имелось быстро тающее меньшинство консерваторов, руководимое влиятельными Оствальдом и Махом, вообще не верившее в существование атомов. В то же время появилось новое поколение ученых, таких как Дж. Дж. Томсон, супруги Кюри и Резерфорд, убежденных в реальности существования атомов и осознавших, хотя и не без колебаний (как, например, Мария Кюри), что химия — это не последнее слово в описании частиц. Для них становились реальностью предположения древних и досягаемой казалась извечная мечта о трансмутациях.

Конец невидимости. Был один вопрос, по которому царило полное согласие между физиками и химиками, атомистами и их противниками; все они признавали: существуют атомы или нет, они слишком малы, чтобы их можно было наблюдать. Наиболее красноречиво высказался по этому поводу Ван-дер-Ваальс в своей докторской диссертации 1873 г., где он выразил надежду на то, что его работа приблизит то время, когда «движение планет и музыка сфер будут на время забыты, и мы в восхищении застынем перед тонкой искусной вязью, образуемой орбитами невидимых атомов» [W3].

Непосредственно наблюдать атом удалось, наконец, в 50-е годы нашего века при помощи полевого ионного микроскопа [M7]. Вообще говоря, частицы меньше атома «увидели» еще раньше. В конце прошлого века α-частицы наблюдали в виде сцинтилляций на экране, покрытом сернистым цинком, а электроны — в виде следов в камере Вильсона. В статье 1828 г., озаглавленной (и это еще неполное название) «Краткий отчет о наблюдениях в микроскоп, проводившихся в июне, июле и августе 1827 г., за частицами, содержащимися в пыльце растений» [B5], ботаник Роберт Броун сообщил о случайных перемещениях мельчайших частиц различных типов, находившихся в воде во взвешенном состоянии. Он исследовал частички пыльцы, «пыли и сажи, оседающей в значительном количестве, особенно в Лондоне, на всех предметах», размолотый камень, в том числе обломок египетского сфинкса, и пр. Сегодня мы говорим, что Броун наблюдал взаимодействие молекул воды с частичками взвеси. Но такого рода объяснение броуновского движения так же зависит от теоретн-

ческого подхода, как и утверждение о том, что тот или иной след в камере Вильсона может быть отождествлен с электроном.

В случае броуновского движения такой теоретический подход осуществил Эйнштейн, который тем самым впервые сделал молекулы «видимыми». В качестве последнего подготовительного шага к объяснению вклада Эйнштейна необходимо вкратце рассказать о том, что было известно в XIX в. о слабых растворах.

§ 5.2. Горшки Пфеффера и законы Вант-Гоффа

В середине 80-х годов прошлого века Вант-Гофф, профессор химии, минералогии и геологии Амстердамского университета, обнаружил в ходе исследований химического равновесия в растворах их «фундаментальную аналогию, даже почти полную тождественность с газами, в частности, если с физической точки зрения рассматривать в растворах так называемое осмотическое давление: ...здесь мы имеем дело не с поверхностной, а с фундаментальной аналогией» [H1]. Экспериментальной основой этого открытия послужили измерения осмоса через неупругие мембраны, выполненные десятилетием раньше Вильгельмом Пфеффером, экстраординарным профессором из Бонна [P4].

Прежде всего напомню, что имел в виду Вант-Гофф под осмотическим давлением. Рассмотрим сосуд, наполненный жидким растворителем. Часть объема V жидкости ограничена мембраной, полностью проницаемой для растворителя. Затем в эту часть объема V вводятся молекулы растворяемого вещества. Если мембрана полностью непроницаема для растворенного вещества, то будет происходить диффузия растворителя в V до момента достижения равновесия. Давление, оказываемое на мембрану при равновесии, и есть, в общем случае, осмотическое давление. Если мембрана обладает упругостью, то это давление будет вызывать ее прогиб. Для частного случая неупругой и непрогибаемой мембраны оказываемое на нее давление есть то, о котором говорил Вант-Гофф и о котором будет идти речь дальше. Это давление может быть вполне ощутимым; например, давление 1 %-ного раствора сахара составляет 2/3 атм.

Одной из заслуг Пфеффера, известного, кроме того, своими работами в области ботаники и физиологии растений, является то, что он первым изготовил такие неупругие мембраны. Он помещал неглазурованные пористые фарфоровые горшки, наполненные водным раствором $K_3Fe(CN)_6$, в сосуд с сульфатом меди. Соль $Cu_2Fe(CN)_6$, оседавшая в порах фарфоровых горшков, выполняла роль неупругой мембраны. Пфеффер проделал с помощью своего изобретения сложные измерения, которые подвели его к выводу о том, что «очевидно, имеется связь между осмотическим давлением, с одной стороны, и размером и числом молекул, с другой» [C4]. Упоминаемая Пфеффером связь была обнаружена Эйнштейном и представлена в его докторской диссертации; при установлении этой связи Эйнштейн пользовался также зако-

нами Вант-Гоффа. В свою очередь, чисто феноменологическое открытие Вант-Гоффа основывалось исключительно на анализе данных, полученных Пфеффером.

Законы Вант-Гоффа применимы к идеальным растворам, «растворам, разбавленным до такой степени, что их можно сравнивать с идеальными газами» [H1] [11]). Для таких идеальных растворов его законы можно сформулировать следующим образом (предполагается, что электролитической диссоциации не происходит):

1. В равновесии имеем

$$pV = R'T \tag{5.2}$$

вне зависимости от природы растворителя. В этом аналоге закона Бойля — Мариотта p — осмотическое давление, V — объем, ограниченный неупругой мембраной, R' — константа, T — температура.

2. Расширение закона Авогадро: одинаковые объемы растворов при одних и тех же значениях p и T содержат одинаковое число молекул растворенного вещества. Это число равно числу молекул газа при таком же давлении (газа) p и той же температуре T. Поэтому для одного грамм-моляя

$$R' = R, \tag{5.3}$$

где R — универсальная газовая постоянная. Таким образом, по Вант-Гоффу, жидкая фаза предоставляла новую возможность измерить универсальную газовую постоянную и, следовательно, новый метод определения постоянной Авогадро.

«То, что молекулы растворенного вещества, присутствующие в слабом растворе, оказывают на полупроницаемую мембрану (несмотря на наличие растворителя) в точности такое же давление, как если бы имелись лишь они и притом в состоянии идеального газа, является настолько поразительным фактом, что неоднократно предпринимались попытки как можно более прозрачной интерпретации этого явления»,— писал Эренфест в 1915 г. [E1]. Эйнштейн вкратце коснулся статистического вывода законов Вант-Гоффа в 1905 г. [E2], однако гораздо большее значение имеет то, как он применил эти законы.

В 1901 г. Вант-Гофф первым получил Нобелевскую премию по химии. В приветственной речи, посвященной этому событию, ясно говорится о том, что в начале XX в. реальность существования молекул не вызывала сомнений у большинства физиков и химиков: «Он доказал, что давление газа и осмотическое давление идентичны, из чего следует, что и сами молекулы в газовой фазе и в растворе также идентичны. В результате была окончательно и бесповоротно доказана законность применения молекулярной концепции в химии, причем с такой степенью общности, о которой раньше не приходилось и мечтать» [N2].

[11]) Вант-Гофф указал, что критерием идеальности раствора может служить пренебрежимо малая теплота растворения.

§ 5.3. Докторская диссертация

В своей докторской диссертации Эйнштейн предложил новый теоретический метод определения радиуса молекул и постоянной Авогадро. Сравнив полученные уравнения с данными по водным растворам сахара, он обнаружил, что

$$N = 2{,}1 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}. \qquad (5.4)$$

В первоначально опубликованном тексте диссертации [E3] имеется посвящение: «Моему другу Марселю Гроссману» и стоит дата завершения работы — 30 апреля 1905 г. Но Эйнштейн представил свою диссертацию декану философского факультета (секция II) Цюрихского университета лишь 20 июля [E4]. Эта задержка могла быть вызвана техническими причинами, но, возможно, она объясняется и тем, что в период с апреля по июль Эйнштейн был занят другим — в это время он заканчивал первые работы по броуновскому движению и специальной теории относительности. Диссертация была принята довольно быстро. Двадцать четвертого июля [12]) декан направил факультету для утверждения положительные отзывы Кляйнера и Буркхарта, к которому обратился Кляйнер для проверки наиболее важных вычислений. Факультет диссертацию утвердил (Буркхарт просмотрел одну серьезную ошибку в вычислениях, но об этом стало известно позже). Эйнштейн стал доктором.

Немногие понимают, что диссертация Эйнштейна — один из его наиболее фундаментальных трудов. Историки и биографы неизменно называют 1905 г. поразительным из-за того, что тогда вышли его статьи по теории относительности, световым квантам и броуновскому движению. По моему мнению, диссертация нисколько не уступает по важности его работе о броуновском движении. В самом деле, в некотором отношении (не полностью), полученные им результаты по броуновскому движению являются следствием его диссертационной работы. Это, кстати, объясняет, почему его работа о броуновском движении была получена редакцией журнала «Annalen der Physik» 11 мая 1905 г., всего лишь через одиннадцать дней после окончания диссертации.

Через три недели после защиты тот же журнал получил экземпляр диссертационной работы для публикации (без посвящения). Она была напечатана [E5] лишь после того, как Эйнштейн направил редакции в январе 1906 г. краткое дополнение (я буду ссылаться на эту работу, как на статью 1906 г.). В результате всех этих задержек диссертация была опубликована в «Annalen der Physik» только после выхода в свет в том же журнале статьи о броуновском движении. Это могло создать кое у кого

---

[12]) Как вспоминал Эйнштейн позднее, после того как ему сообщили о том, что рукопись слишком коротка, он добавил одну фразу, и она была тут же принята [S2]. Мне не удалось найти никаких следов такой переписки, и вообще неясно, когда она могла происходить.

впечатление (см., например, [L2]), что соотношение между диффузией и вязкостью — очень важное уравнение, вывод которого связан с именами Эйнштейна и Сазерленда,— было впервые получено Эйнштейном в статье о броуновском движении. На самом деле впервые оно появилось в его диссертации.

В дополнении к статье 1906 г. Эйнштейн дал новое и (как оказалось) более верное значение N:

$$N = 4{,}5 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \qquad (5.5)$$

Существенное расхождение между этим результатом и значением, полученным восемью месяцами раньше, целиком связано с появлением более точных данных по водным растворам сахара.

Помимо фундаментальных результатов, содержащихся в диссертации, есть еще одна причина, по которой эта работа представляет особый интерес: из всех трудов Эйнштейна она имеет наиболее широкое практическое применение.

При исследовании частоты цитирования научных работ вырисовывается картина, которую, воспользовавшись словами Монтеня о человеческом разуме, хочется назвать ondoyant et divers [«непостоянной и вечно колеблющейся» (*фр.*).— *Перев.*]. О влиянии Эйнштейна на работы других ученых можно судить по частоте цитирования его статей. Из одиннадцати научных статей, опубликованных до 1912 г. и наиболее часто цитировавшихся в период с 1961 по 1975 г., четыре принадлежат перу Эйнштейна. Из этих четырех работ на первом месте стоит его диссертация (вернее, статья 1906 г.), на втором — дополнение к этой статье (к которому мы вернемся чуть позже), написанное в 1911 г. Работа о броуновском движении занимает третье место, а статья о критической опалесценции — четвертое. В списке научных работ Эйнштейна, наиболее часто цитировавшихся с 1970 по 1974 г., на первом месте стоит статья 1906 г. Она цитировалась в четыре раза чаще, чем первая обзорная статья Эйнштейна по общей теории относительности, вышедшая в 1916 г., и в восемь раз чаще его статьи 1905 г., посвященной световым квантам [C5].

Конечно, частота цитирования еще не может служить показателем относительной важности работы. Кто не мечтал написать работу настолько фундаментальную, чтобы она тут же стала известна всем и даже не было бы нужды ее цитировать? Тем не менее, очевидно, должны быть серьезные причины такой популярности диссертации Эйнштейна. Причины эти не так уж трудно обнаружить: диссертация, в которой рассматривались объемные реологические свойства взвеси частиц, содержит результаты, имеющие исключительно широкую сферу применения. Они используются в строительстве (движение частиц песка в цементных растворах [R4]), молочной промышленности (движение казеиновых мицелл в коровьем молоке [D3]), в экологии (движение частиц аэрозоля в облаках [Y2])— и это лишь некоторые взятые наугад примеры. Эйнштейну, наверное, приятно было бы узнать

об этом, так как он всегда ратовал за применение физики на практике.

Займемся теперь докторской диссертацией подробней. На первом этапе Эйнштейн использовал гидродинамику. Рассмотрим установившееся течение несжимаемой однородной жидкости. Если пренебречь влиянием ускорения, то такое течение описывается упрощенными уравнениями Навье — Стокса:

$$\nabla p = \eta \Delta \mathbf{v}, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \tag{5.6}$$

где $\mathbf{v}$ — скорость, p — гидростатическое давление, η — вязкость. Затем введем в жидкость большое число идентичных упругих сферических частиц. Радиус частиц растворенного вещества принимается большим по сравнению с радиусом молекул растворителя, вследствие чего растворитель может по-прежнему считаться сплошной средой. Раствор предполагается слабым; общий объем частиц гораздо меньше объема жидкости. Допустим далее, что (1) движение системы в целом описывается уравнениями Навье — Стокса, (2) инерцией частиц растворителя при их поступательном или вращательном движении можно пренебречь, (3) внешние силы отсутствуют, (4) на движении любой из малых сферических частиц не сказывается наличие других частиц, (5) частицы движутся лишь под влиянием гидродинамического давления, воздействующего на их поверхность, и (6) в качестве граничного условия принимается, что скорость течения $v = 0$ на поверхности сферических частиц. В таком случае, как показал Эйнштейн, к течению по-прежнему применимы уравнения (5.6) при условии замены η новой «эффективной вязкостью» η^*, задаваемой выражением

$$\eta^* = \eta(1 + \varphi), \tag{5.7}$$

где φ — доля объема, занимаемая (равномерно распределенными) сферами. Пусть в роли сфер выступают молекулы (не подверженные диссоциации). Тогда

$$\varphi = (N\rho/m)\,(4\pi/3)a^3, \tag{5.8}$$

где N — постоянная Авогадро, ρ — масса растворенного вещества на единицу объема, m — молекулярный вес растворенного вещества, a — радиус молекул. У Эйнштейна были данные по значению отношения η^*/η для слабых водных растворов сахара, т. е. φ и m также были известны. Таким образом, уравнения (5.7) и (5.8) задают первое соотношение между неизвестными N и a.

Затем Эйнштейн вывел второе соотношение между N и a (при этом он поступил в духе Лошмидта [13])). Здесь он использовал частично термодинамический, частично динамический подход. Этот подход конспективно изложен в его диссертации и — более

---

[13]) См. § 5.1. Единственный предложенный в XIX в. метод определения N и a, упоминаемый Эйнштейном в его обзоре по кинетической теории 1915 г. [E6], принадлежит Лошмидту.

подробно — в первой статье о броуновском движении [E2]. Он отличается исключительной изобретательностью.

Рассмотрим сначала идеальный газ, на молекулы которого в отрицательном направлении по оси x действует не зависящая от времени сила K. Сила, прикладываемая к единице объема, равна $K\rho N/m$. В тепловом равновесии баланс между этой силой и давлением газа p задается выражением

$$K\rho N/m = \partial p/\partial x = (RT/m)\,(\partial\rho/\partial x), \qquad (5.9)$$

где R — универсальная газовая постоянная. Далее, рассуждал Эйнштейн, по закону Вант-Гоффа уравнение (5.9) должно быть также справедливым и для слабых растворов при условии, что не зависящая от времени сила K действует только на молекулы растворенного вещества.

Пусть сила K вынуждает молекулы растворенного вещества двигаться со скоростью v (по отношению к растворителю). Если средняя длина свободного пробега молекул растворителя намного меньше диаметра молекул растворенного вещества, то (с учетом граничного условия $v = 0$ на поверхности частиц растворенного вещества) получаем хорошо известное соотношение Стокса:

$$K = 6\pi\eta a v, \qquad (5.10)$$

вследствие чего под воздействием силы K за секунду через единицу площади поперечного сечения в отрицательном направлении по оси x проходит $K\rho N/6\pi\eta a m$ молекул растворенного вещества. Возникающий градиент концентрации приводит к диффузии в направлении оси x с плотностью потока $(DN/m)\,(\partial\rho/\partial x)$, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, где, по определению, D — коэффициент диффузии. Условие динамического равновесия требует, чтобы диффузионный поток равнялся потоку, вызванному воздействием силы K:

$$\rho K/6\pi\eta a = D\,\partial\rho/\partial x. \qquad (5.11)$$

Тогда из условий теплового равновесия [уравнение (5.9)] и динамического равновесия [уравнение (5.11)] следует

$$D = (RT/N)\,(1/6\pi\eta a). \qquad (5.12)$$

Отметим, что в уравнении (5.12) сила K отсутствует. Итак, хитрость заключалась в том, чтобы использовать K только в качестве промежуточной величины, необходимой для установления связи между коэффициентом диффузии и вязкостью в режиме течения Стокса. Уравнение (5.12) дает второе соотношение между неизвестными N и a.

По весьма примечательному стечению обстоятельств уравнение (5.12) было получено в Австралии практически в то же время, когда Эйнштейн писал свою диссертационную работу. В марте 1905 г. статья, в которой тем же методом получен точно

такой же результат, была представлена в печать Уильямом Сазерлендом [S2a]. Таким образом, уравнение (5.12) следовало бы по справедливости назвать уравнением Сазерленда — Эйнштейна.

Отметим, что при выводе уравнения (5.12) не учитываются характеристики движения частиц растворенного вещества. В этом заключается сила того подхода, который, как тема с вариациями, многократно используется Эйнштейном в его последующих работах: «систематическая» сила, сила сопротивления стоксова типа (т. е. пропорциональная скорости), приравнивается к силе случайно изменяющейся величины. В данном случае, как и при броуновском движении, переменная сила вызывается тепловым движением молекул среды, причем к наличию диффузии приводят флуктуации. Позже, в 1909 и 1917 гг., Эйнштейн опять использовал равенство стоксовой силы и переменной силы, вызываемой электромагнитным излучением.

В течение пяти лет после опубликования диссертации Эйнштейна все было спокойно. Но потом некто Баслен, ученик Жана Батиста Перрена, сообщил Эйнштейну о том, что в ходе выполненных им измерений он получил значение η^*, гораздо большее, чем следует из уравнения (5.7). Как мы увидим в следующем параграфе, к тому времени Перрен имел уже неплохое представление о том, каким должно быть значение N. Поэтому он мог рассчитать η^* (зная a из других источников) и сравнить полученный результат с экспериментом! Узнав о расхождении в результатах, Эйнштейн посадил одного из своих студентов за работу, и тот обнаружил элементарную, но не тривиальную ошибку в выводе уравнения (5.7). Правильный результат имеет вид [E7]

$$\eta^*/\eta = 1 + 5\varphi/2. \tag{5.13}$$

При тех же данных, которые Эйнштейн использовал раньше для получения уравнения (5.5), новое значение

$$N = 6{,}6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, \tag{5.14}$$

что представляет собой гораздо лучший результат; остановлюсь на нем в следующем параграфе.

В заключение следует отметить, что, как известно сейчас, уравнение (5.13) справедливо лишь для $\varphi < 0{,}02$ [14]). Теоретические предложения о внесении поправок порядка $O(\varphi^2)$ в правую часть уравнения (5.13) делались вплоть до 1977 г. К эффектам, вызывающим появление членов порядка φ^2, принадлежат наличие взаимодействия между двумя частицами [B6], а также явление, которое еще не обсуждалось в диссертации Эйнштейна,— броуновское движение частиц растворенного вещества [B7].

---

[14]) См. обзоры Ратлжерса, в которых теория сравнивается с экспериментом, а также приведен обширный перечень предложений по внесению поправок в уравнение (5.13) [R5].

§ 5.4. Одиннадцать дней спустя: броуновское движение [15])

Некоторые дополнительные сведения из истории физики XIX в. В XIX в. благодаря экспериментам, проведенным в различных лабораториях, стало ясно, что интенсивность броуновского движения растет при уменьшении размера и плотности взвешенных частиц (типичным размером, при котором еще наблюдается броуновское движение, является радиус частиц порядка 10^{-3} мм), снижении вязкости и повышении температуры жидкости. Кроме того, результаты этих исследований характеризуются значительным уменьшением числа возможных объяснений; еще Броун пришел к выводу, что это движение не имеет ничего общего с перемещением мельчайших живых существ. Дальнейшие исследования позволили отбросить такие объяснения, как градиент температур, механические возмущения, капиллярность, воздействие излучения (до тех пор, пока можно пренебречь соответствующим ростом температуры) и наличие в жидкости конвективных токов. Как и следовало ожидать, не все эти выводы были сразу приняты без сопротивления.

В 60-е годы прошлого века все более широкое распространение получило представление о том, что причины рассматриваемого явления кроются во внутренних свойствах движения в жидкости. Вскоре после этого было сделано предположение о том, что зигзагообразное движение частиц взвеси есть результат их соударений с молекулами жидкости. По меньшей мере три физика независимо друг от друга высказали эту идею: Джованни Кантони из Павии и два бельгийских иезуита — Жозеф Дельсо и Иньяс Карбонель. Конечно, это были не доказательства, а умозрительные рассуждения. «Я считаю, что пляска твердых частиц... может объясняться различными скоростями, которые приобретают... либо указанные твердые частицы, либо молекулы жидкости, ударяющие [по твердым частицам] со всех направлений»,— писал Кантони [C6]. «В соответствии с моим подходом к рассматриваемому явлению, броуновское движение может быть результатом теплового движения молекул окружающей жидкости»,— писал Дельсо [D4].

Однако вскоре эти предположения натолкнулись на серьезные возражения со стороны швейцарского ботаника Карла фон Негели, а также Уильяма Рамзая. В своих контраргументах они исходили из неверной посылки о том, что каждый одиночный зигзаг траектории частицы взвеси вызывается единственным столкновением с единичной молекулой. Хотя в то время эксперименты не отличались высокой точностью, все же нетрудно было видеть, что такое предположение приводит к абсурду. Не-

[15]) Статьи Эйнштейна о броуновском движении, а также его работа 1906 г. были собраны Фюртом [F1] в удобный маленький томик. Полезный, хотя и неполный список экспериментальных и теоретических работ XIX в. приведен в статье Смолуховского [S3]; см. также [B4, т. 2, гл. 15; N1, с. 9—13, 21—29].

смотря на это, идею о соударениях с молекулами не отвергли полностью. К примеру, Луи Жорж Гюи, ученый, выполнивший в XIX в. лучшие из экспериментальных работ по броуновскому движению, согласился с возражениями Негели и Рамзая и потому предположил, что молекулы жидкости перемещаются согласованно, группами, в результате чего каждое отдельное соударение, испытываемое частицей взвеси, вызывается одновременным воздействием большого числа молекул.

Гюи был также первым, кто заметил, что в рамках термодинамики броуновское движение объяснить довольно трудно. Он считал возможным, хотя бы в принципе, создание вечного двигателя второго рода, который приводился бы в действие этим непрестанным движением. (Следует подчеркнуть, что опровержение довольно тонко. Лучшая статья по этой проблеме написана Лео Силардом [S4].) Поэтому Гюи считал, что принцип Карно (второй закон термодинамики) может быть несправедлив для областей с линейным размером порядка 1 мкм [G2].

Пуанкаре, к которому на рубеже двух веков часто обращались для того, чтобы он подытожил положение дел в физике, довел эти идеи до сведения широкой научной общественности. Во вступительной речи на открытии Международного физического конгресса 1900 г. в Париже, упомянув об идеях Гюи, касающихся броуновского движения, он заметил: «Тем самым как бы видна работа максвеллова демона» [P5]. В лекции «Кризис математической физики», прочитанной в 1904 г. в Сент-Луисе на Конгрессе наук и искусств, он поставил принцип Карно во главу перечня физических законов, оказавшихся под угрозой: «[Броун] вначале полагал, что это движение есть проявление жизни; но скоро обнаружилось, что неодушевленные тела танцуют с не меньшей энергией, тогда это явление перешло в ведение физиков... На наших глазах то движение в результате трения превращается в теплоту, то, наоборот, теплота превращается в движение... Это противоречит принципу Карно» [P5].

Переопределение *N*. В 1905 г. Эйнштейн пребывал в блаженном неведении относительно подробностей истории исследования броуновского движения. В то время он не знал ни о работах Пуанкаре по теории относительности, ни о том, что он говорил «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты», как назвал Эйнштейн свою первую работу о броуновском движении [E2]. Упоминание о покоящейся жидкости, несомненно, показывает, что в этом состоит отличие от предыдущей статьи, законченной одиннадцатью днями раньше, где рассматривалось течение жидкости. Отсутствие в заголовке слов «броуновское движение» объясняется во второй фразе статьи: «Возможно, что рассматриваемые движения тождественны с так называемым броуновским молекулярным движением; однако доступные мне данные настолько не точны, что я не мог составить об этом определенного мнения».

В этой статье, полученной редакцией журнала «Annalen der Physik» 11 мая 1905 г., Эйнштейн сделал третье за два месяца фундаментальное открытие, связанное с определением постоянной Авогадро. Все три метода совершенно различны. Первый метод (он предложен в статье, полученной тем же журналом 18 марта 1905 г.), в котором используется длинноволновый предел закона излучения черного тела, позволил ему получить значение $N = 6{,}17 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ (!) (§ 19.2). Во втором методе рассмотрено течение несжимаемой жидкости, что, как мы видели в предыдущем параграфе, дало $N = 2{,}1 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Третий метод, рассмотрение броуновского движения, позволил ему получить формулу, но еще не число. «Если бы какому-либо исследователю удалось вскоре ответить на поднятые здесь важные для теории теплоты вопросы!»,— написал он в конце статьи [16]). Хотя Эйнштейн и не был знаком с литературой, он правильно предположил, что соответствующих данных еще нет. Вскоре положение изменилось. Кстати, ни в диссертации, ни в статье о броуновском движении Эйнштейн не упоминал о том, что в 1905 г. он дал не один, а несколько методов определения значения N. Насколько редко в его работах можно встретить ссылки на других, настолько же редко он ссылался на свои статьи. Он не принадлежал к числу людей, любящих делать ссылки.

Но Эйнштейн еще не закончил придумывать новые методы определения постоянной Авогадро. В конце того же года, в декабре, он завершил вторую статью о броуновском движении, в которой предложены еще два метода определения N [E8]. В 1907 г. он указал, что измерение флуктуаций напряжения также позволяет найти значение N [E9]. В 1910 г. он предложил еще один метод, на этот раз в статье о критической опалесценции [E10]. Эйнштейн, несомненно, понимал, что факт «повсеместного присутствия» N должен раз и навсегда решить проблему существования молекул, как и произошло на самом деле.

Ранее уже упоминалось, что к концу XIX в. практически все ученые соглашались с существованием атомов и молекул, хотя и оставались отдельные очаги сопротивления. Вернее, дискуссия о реальности существования молекул была окончательно прекращена лишь в результате научных достижений первого десятилетия XX в. Это произошло не вследствие публикации первой статьи Эйнштейна о броуновском движении или появления какой-либо другой работы по определению значения N. Скорее, вопрос был решен раз и навсегда ввиду небывало близкого совпадения значений N, полученных самыми разными методами. Окончательный вывод был сделан не в результате определения, а в результате переопределения N. Изучение таких разных явлений, как радиоактивность, броуновское движение, голубой цвет

[16]) Далее я учитываю замечание Эйнштейна [E2] о том, что его молекулярно-кинетический вывод закона Вант-Гоффа, также содержащийся в этой статье, не является необходимым для понимания дальнейшей аргументации.

неба, позволило к 1909 г. утверждать, что десяток независимых методов определения N дает значение, лежащее в пределах от $6 \cdot 10^{23}$ до $9 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Перрен в заключении к своей статье 1909 г., посвященной этой проблеме [P6, P7], имел все основания заявить: «Я считаю, что... [человек], свободный от предрассудков, должен испытывать сильные чувства, размышляя над поразительным разнообразием явлений, приводящих к одному и тому же результату; отныне будет очень трудно на основе рациональной аргументации защищать позицию, враждебную молекулярной гипотезе» [P7][17]).

Первая статья Эйнштейна о броуновском движении. Основываясь на сделанных ранее замечаниях, поясню теперь, в каком смысле первая статья Эйнштейна о броуновском движении является своего рода комментарием к докторской диссертации. Для этого необходимо вновь обратиться к соотношению между коэффициентом диффузии D и вязкостью η, упоминавшемуся ранее [см. (5.12)]. Напомню основные соображения, на которых базируется вывод уравнения (5.12):

1) применимость законов Вант-Гоффа [уравнения (5.2) и (5.3)];

2) справедливость закона Стокса [уравнение (5.10)];

3) процесс диффузии в направлении x описывается выражением, которое раньше в явном виде не фигурировало:

$$D\,\partial^2 n/\partial x^2 = \partial n/\partial t, \qquad (5.15)$$

где $n(x, t)$ — число частиц в единице объема вблизи координаты x в момент времени t.

Суть подхода Эйнштейна к рассмотрению броуновского движения заключается в следующем предположении: то, что годится для растворов, пригодно и для взвесей (если удовлетворяются три указанных условия):

1) законы Вант-Гоффа должны быть справедливы не только для слабых растворов, но и для слабых взвесей: «Нет причин, по которым некоторое число взвешенных частиц не вызывало бы такое же осмотическое давление, что и то же число молекул растворa» [E2];

2) не говоря об этом прямо, Эйнштейн предполагал, что закон Стокса по-прежнему справедлив; напомним, что при этом жидкость должна вести себя как сплошная среда (это также предполагает, что все частицы взвеси имеют один и тот же радиус);

3) броуновское движение считается диффузионным процессом, описываемым уравнением (5.15). (Для простоты Эйнштейн рассмотрел лишь одномерный случай.)

Перейдем теперь к фундаментальному решению уравнения (5.15) для случая, когда в момент времени $t = 0$ все частицы

---

[17]) О положении дел с определением N на 1980 г. см. [D2].

находятся в начале координат:

$$n(x,\ t) = (n/\sqrt{4\pi Dt})\exp(-x^2/4Dt), \qquad (5.16)$$

где $n = \int n(x)\,dx$. Средний квадрат смещения $\langle x^2\rangle$ по отношению к началу координат задается выражением

$$\langle x^2\rangle = (1/n)\int x^2 n(x,\ t)\,dx = 2Dt. \qquad (5.17)$$

Из уравнений (5.12) и (5.17) имеем

$$\langle x^2\rangle = (RT/3\pi Na\eta)t. \qquad (5.18)$$

В этом фундаментальном решении уравнения, описывающего броуновское движение, $\langle x^2\rangle$, t, a и η измеримы, следовательно, можно определить значение N. Как уже говорилось ранее, не перестаешь удивляться этому результату, полученному как бы из ничего: приготовьте взвесь сферических частиц, размер которых довольно велик по сравнению с диаметром простых молекул, возьмите секундомер да микроскоп и, пожалуйста, определяйте постоянную Авогадро!

Как подчеркивал Эйнштейн, предположение о том, что в момент $t = 0$ все частицы находятся в начале координат, не является необходимым. Так как, по определению, частицы движутся независимо, $n(x,\ t)dx$ можно считать числом частиц, сместившихся за t секунд на расстояние между x и $x + dx$. Он дал и пример: для воды при 17 °C $a \approx 0{,}001$ мм, $N \approx 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ и получаем $\langle x^2\rangle^{1/2} \approx 6$ мкм, если $t = 1$ мин.

Уравнение (5.18) представляет собой первое флуктуационно-диссипативное соотношение — средний квадрат флуктуаций связывается в нем с диссипативным процессом, феноменологически описываемым параметром вязкости.

Статья Эйнштейна сразу привлекла к себе внимание. В сентябре 1906 г. он получил письмо от Вильгельма Конрада Рентгена с просьбой послать ему оттиск статьи о теории относительности. В этом же письме Рентген проявил большой интерес к работе Эйнштейна о броуновском движении, поинтересовался его мнением об идеях Гюи и добавил: «Видимо, непросто добиться согласия между [броуновским движением] и вторым законом термодинамики» [R6]. Трудно представить, чтобы Эйнштейн не ответил столь уважаемому коллеге. Однако его ответа (если таковой был) найти не удалось.

Диффузия как марковский процесс. Вся «физика» первой статьи Эйнштейна о броуновском движении содержится в уравнении (5.18). Но эта статья характерна еще одним новшеством, тоже простым и глубоким, касающимся *толкования* уравнения (5.15). Это уравнение, датируемое XIX в., было выведено применительно к теории сплошных сред. В 1905 г. Эйнштейн, раздумывая над броуновским движением, дал новый вывод уравнения диффузии.

Как и при выводе уравнения (5.12), предположим (говорит Эйнштейн), что взвешенные частицы движутся независимо друг от друга. Будем считать, что можно определить интервал времени τ, малый по сравнению с временем наблюдения t в уравнении (5.18); вместе с тем, интервал τ достаточно велик, так что на движении одной частицы в течение времени τ не сказывается предыстория ее движения. Пусть $\varphi(\Delta)d\Delta$ есть вероятность смещения частицы за интервал времени τ из положения Δ в положение $\Delta + d\Delta$. Вероятность φ нормирована и симметрична:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\Delta)\, d\Delta = 1, \qquad \varphi(\Delta) = \varphi(-\Delta). \tag{5.19}$$

Так как частицы движутся независимо, можно связать $n(x, t+\tau)dx$ с распределением в момент t:

$$n(x, t+\tau)\, dx = dx \int_{-\infty}^{+\infty} n(x+\Delta, t)\, \varphi(\Delta)\, d\Delta. \tag{5.20}$$

Разложим в ряд левую часть до членов первого порядка по τ, правую часть — до членов второго порядка по Δ и применим уравнение (5.19). В результате получим уравнение (5.15), где D теперь *определяется* как второй момент вероятности распределения φ:

$$D = \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 \varphi(\Delta)\, d\Delta. \tag{5.21}$$

Итак, вся информация о динамике соударений в явном виде выражается через $\varphi(\Delta)$. Огромное достоинство уравнения (5.18) в том, что оно не зависит от анализа процесса соударений, за исключением самых общих условий, на основе которых получено уравнение (5.21).

Сегодня мы сказали бы, что в 1905 г. Эйнштейн рассматривал диффузию как марковский процесс (названный по имени Андрея Андреевича Маркова, предложившего в 1906 г. так называемые марковские цепи), установив тем самым связь между случайным смещением одной частицы и диффузией множества частиц.

Следующие статьи. Вкратце остановимся на основных моментах, содержащихся в последующих статьях Эйнштейна, посвященных броуновскому движению.

А. Декабрь 1905 г. [E8]. Узнав от коллег, что выводы его предыдущей статьи, во всяком случае по порядку, совпадают с экспериментальными данными по броуновскому движению, Эйнштейн озаглавил следующую статью «К теории броуновского движения». Он предложил в ней два новых применения своих идей: рассмотрел вертикальное распределение взвеси при наличии тяготения, а также вращательное броуновское движение для

случая вращающихся твердых сферических частиц. Соответственно он предложил два новых уравнения, позволяющие определить значение N. Он отметил также, что уравнение (5.18) не выполняется для малых значений t, так как из него следует, что при $t \to 0$ средняя скорость $\langle x^2 \rangle^{1/2}/t$ становится бесконечной. «Такой результат связан с тем, что в нашем рассуждении мы предполагали, что процесс в течение времени t может рассматриваться как полностью не зависящий от процесса за непосредственно предшествующее время. Такое предположение тем хуже оправдывается, чем меньше выбран промежуток времени t»[18]).

Б. Декабрь 1906 г. [E9]. Краткое сообщение о «явлении в области электричества, родственном броуновскому движению»; имеется в виду средний квадрат флуктуаций потенциала (зависящих от температуры) в зазоре между пластинами конденсатора.

В. Январь 1907 г. [E11]. Эйнштейн поставил новый вопрос и дал на него ответ. Из предположения о том, что взвесь подчиняется закону Вант-Гоффа, и из закона равнораспределения следует, что средний квадрат *мгновенной* скорости $\langle v^2 \rangle$ равен $3RT/mN$, где m — масса частицы взвеси. В результате $\langle v^2 \rangle$ получается на много порядков выше, чем $\langle x^2 \rangle / t^2$ — квадрат средней скорости, рассчитанный по уравнению (5.18) для приемлемых значений t. Нет ли здесь противоречия? Нет, ответил Эйнштейн, так как можно полагать, что мгновенная скорость изменяется по направлению и значению за время порядка 10^{-7} с и, следовательно, $\langle v^2 \rangle$ в экспериментах по броуновскому движению является величиной ненаблюдаемой. Это есть также ответ на возражения Негели и Рамзая.

Г. 1908 г. По предложению физика и химика Рихарда Лоренца Эйнштейн дал элементарное изложение теории броуновского движения [E12].

Этим завершается рассказ о вкладе Эйнштейна в разработку классической теории броуновского движения. Квантовые аспекты будут обсуждаться в ч. VI. В заключение — несколько отрывочных комментариев о дальнейших работах в области классической теории броуновского движения.

Предложенное Эйнштейном соотношение [уравнение (5.18)] сейчас обычно выводится при помощи уравнения Ланжевена, полученного в 1908 г. [L3]. Первая обзорная статья о броуновском движении вышла в 1909 г. [J1]. Впоследствии эта тема разветвилась на несколько направлений; рассматриваются, в частности, поведение системы при малых значениях t, нестоксово течение и наличие внешних сил [W4]. Броуновское движение было предметом активных исследований и в середине 70-х годов нашего века [B8].

О том, как быстро новая серия практических исследований экспериментально подтвердила правоту Эйнштейна, и в особен-

---

[18]) Общее решение для всех t было предложено независимо Орнштейном [O2] и Фюртом [F2].

пости о ключевой роли Жана Перрена и его школы, рассказано в работе Ная [N1]. Как и прежде, актуальной остается и книга самого Перрена «Атомы», впервые опубликованная в 1913 г. и переведенная на английский [P8][19]). Помимо сообщения об определении N на основе изучения броуновского движения, в ней содержится краткий обзор всех методов нахождения N, опробованных к тому времени. Весьма примечательно, что метод, предложенный Эйнштейном в его докторской диссертации, отсутствует. Я уже упоминал ранее, что письмо ученика Перрена помогло Эйнштейну обнаружить ошибку в диссертации. Перрен, несомненно, знал об этом, так как вскоре Эйнштейн направил ему письмо, в котором поблагодарил за поправку и дал правильный результат [E13]. Очень неплохое значение N, полученное Эйнштейном [уравнение (5.14)], было опубликовано в 1911 г. Отсутствие этого результата в книге Перрена указывает на то, что докторскую диссертацию Эйнштейна поначалу оценили далеко не все. Об этом также свидетельствует краткая заметка, опубликованная Эйнштейном в 1920 г. [E14] с единственной целью привлечь внимание к поправке, напечатанной в 1911 г. [E7], «которая, похоже, до сих пор ускользала из поля зрения всех работающих в данной области».

«Я считал, что невозможно изучить броуновское движение с такой степенью точности»,— писал Эйнштейн Перрену из Цюриха в конце 1909 г. [E15]. Из письма также видно, что к тому времени Эйнштейна уже больше волновали проблемы квантовой теории. Он интересовался у Перрена, следует ли придавать значение 15 %-ному расхождению в значениях N, полученных из закона излучения Планка и из исследований броуновского движения. Это расхождение представлялось ему «вызывающим беспокойство, так как может создаться впечатление, что теоретические основы формулы Планка недостоверны».

Из анализа работ Эйнштейна по броуновскому движению видно, что они имели большое значение для подтверждения реальности существования молекул. Однако, по мнению самого Эйнштейна, важность его теории броуновского движения для дальнейшего развития физики состоит не только в этом. В 1915 г. он писал об этих своих работах: «Броуновское движение имеет большое значение... потому, что оно позволяет... точно вычислить число N... Однако большое принципиальное значение броуновского движения... заключается в том, что... мы видим в микроскоп непосредственно часть тепловой энергии в форме механической энергии движущихся частиц» [E6]. И снова в 1917 г.: «Познание сущности броуновского движения привело к внезапному исчезновению всяких сомнений в достоверности больцмановского понимания термодинамических законов» [E16].

---

[19]) Настоятельно рекомендую ознакомиться также с избранными трудами Перрена [P9].

§ 5.5. Эйнштейн и Смолуховский. Критическая опалесценция

Если бы Мариан Риттер фон Смолан-Смолуховский был только выдающимся физиком-теоретиком и не был к тому же еще и прекрасным экспериментатором, он, возможно, первым опубликовал бы количественную теорию броуновского движения.

Смолуховский, поляк по происхождению, провел ранние годы жизни в Вене, где и получил университетское образование. Окончив в 1894 г. университет, он несколько лет работал в различных лабораториях за рубежом, после чего вернулся в Вену, где занял должность приват-доцента. В 1900 г. он стал профессором теоретической физики в Лемберге (сейчас Львов), где и работал до 1913 г. На это время приходятся его основные научные достижения. В 1913 г. он занял пост директора Института экспериментальной физики Ягеллонского университета в Кракове. Здесь он и скончался в 1917 г., став жертвой эпидемии дизентерии [20]).

Удивительно, как часто Смолуховский и Эйнштейн одновременно и независимо занимались близкими, если не одними и теми же проблемами. В 1904 г. Эйнштейн работал над проблемой флуктуации энергии [E17], Смолуховский — над исследованием флуктуаций числа частиц идеального газа [S5]. Эйнштейн закончил свою первую статью о броуновском движении в мае 1905 г., Смолуховский — в июле 1906 г. [S3]. Позднее мы столкнемся с еще одним таким примером, но сначала остановимся на броуновском движении.

В отличие от Эйнштейна, Смолуховский был отлично знаком с исследованиями броуновского движения в XIX в. благодаря дружбе с сокурсником по университету Феликсом Экснером, который выполнил несколько отличных работ по этой теме. Это видно и из его статьи 1906 г., в которой содержится критический анализ всех объяснений этого явления до публикации теории Эйнштейна. Как и Эйнштейн (но до него), Смолуховский отверг возражение Негели и Рамзая, указав, что наблюдаемое броуновское движение является результатом примерно 10^{20} соударений в секунду. Кроме того, он отмел и другое возражение: «Негели считает, что [влияние соударений] должно в среднем уравновешиваться. Это такая же концептуальная ошибка, как мнение некоторых игроков, будто нельзя проиграть больше, чем одну ставку». Смолуховский проиллюстрировал этот комментарий расчетом вероятности выигрыша некоторой заданной суммы денег (с учетом знака!) в результате подбрасывания монеты фиксированное число раз.

---

[20]) Подробно о жизни и работах Смолуховского можно прочесть в биографии, написанной Теске [T4], где содержится его переписка с Эйнштейном, ссылки на которую будут делаться в дальнейшем. Я смог лучше понять вклад Смолуховского, ознакомившись и с неопубликованной рукописью Марка Каца.

В начале своей статьи 1906 г. [S3] Смолуховский ссылается на две статьи Эйнштейна, вышедшие в 1905 г.: «Результаты [этих работ] находятся в полном согласии с некоторыми из результатов, полученных мной несколько лет назад; я считаю это важным аргументом в пользу кинетической природы данного явления». Почему же он не опубликовал их раньше? «Хотя мне до сих пор так и не удалось экспериментально проверить указанную точку зрения, как я намеревался сделать ранее, я решил все же опубликовать свои соображения...». Мотивируя это решение, он отмечает, что его кинетический метод представляется более очевидным, простым, а следовательно, и более убедительным, чем метод Эйнштейна, в котором кинетика соударений в явном виде не присутствует. Соглашаться или не соглашаться с таким выводом (я с ним не согласен) — зависит в определенной степени от знакомства с каждым из указанных методов. Но как бы то ни было, статья Смолуховского является выдающимся вкладом в физику, несмотря на неоспоримый приоритет Эйнштейна (который признавал и сам Смолуховский [S6]).

Смолуховский рассматривает частицы взвеси как упругие сферы, имеющие постоянную мгновенную скорость, задаваемую по закону равнораспределения. Он начинает со случая Кнудсена (средняя длина свободного пробега *велика* по сравнению с радиусом a), использует кинематику соударений упругих сфер, рассчитывает среднее изменений направления на одно соударение частицы взвеси с молекулой жидкости и, таким образом, находит выражение для $\langle x^2 \rangle$ [естественно, отличающееся от уравнения (5.18)]. Он рассматривает вначале случай Кнудсена, потому что кинетически он проще случая Стокса, для которого длина свободного пробега *мала* по сравнению с a. В этом случае он получил уравнение (5.18) для $\langle x^2 \rangle$, но с множителем 27/64 в правой части. Этот лишний множитель в следующих работах Смолуховского был опущен.

До нас дошли шесть писем из его переписки с Эйнштейном. Все свидетельствуют о сердечности и взаимном уважении. Переписка завязалась после того, как в 1908 г. Эйнштейн сообщил Смолуховскому, что направил ему несколько оттисков своих статей, и просил о том же Смолуховского [E18]. Следующее письмо датируется ноябрем 1911 г., оно также направлено Эйнштейном и касается новой проблемы, которой они оба были заняты в то время,— критической опалесценции.

С середины 70-х годов прошлого века было известно, что рассеяние света при прохождении его через газ значительно возрастает при определенной критической температуре [A2]. В 1908 г. Смолуховский первым предположил, что это явление связано со значительными флуктуациями плотности [S7]. Он получил уравнение для среднего квадрата числа флуктуаций $\overline{\delta^2}$:

$$\overline{\delta^2} = RT/[NV(-\partial p/\partial V)_T], \qquad (5.22)$$

справедливое до членов порядка $O((\partial^3 p/\partial V^3)_T)$. Для идеального

газа $\overline{\delta^2} \sim 1/N$, но около критической точки, где $(\partial p/\partial V)_T = -(\partial^2 p/\partial V^2)_T = 0$, правая часть уравнения (5.22) расходится. «Эти сгущения и разрежения должны вызывать соответствующие локальные флуктуации плотности и показателя преломления относительно среднего значения, в результате чего проявляется крупнозернистость среды в виде эффекта Тиндаля, с резко выраженным максимальным значением в критической точке. Таким образом, критическая опалесценция объясняется очень просто: как следствие явления, которое не может отрицать никто из тех, кто придерживается принципов кинетической теории» [S8].

Итак, Смолуховский понимал не только истинную природу критической опалесценции, но и связь этого явления с голубизной дневного неба и красным цветом заката. Еще в 1869 г. Джон Тиндаль объяснил голубой цвет неба рассеянием света частицами пыли и водяными каплями; это и есть так называемый эффект Тиндаля [T5]. Рэлей, время от времени возвращавшийся к этой проблеме в течение почти полувека, пришел к выводу, что частицами, вызывающими неоднородность, являются сами молекулы воздуха. Смолуховский считал, что связь между критической опалесценцией и рэлеевским рассеянием качественная. Он не дал подробного расчета рассеяния: «Точный расчет ... потребует значительного пересмотра вычислений Рэлея» [S7].

В 1910 г. к рассмотрению этой проблемы подключился Эйнштейн; он рассчитал рассеяние для слабонеоднородной неноглощающей среды [E10] (и монохроматического поляризованного света):

$$r = \frac{RT}{9N} \frac{(n^2-1)^2 (n^2+2)^2}{-v\,(\partial p/\partial v)_T} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{\Phi}{(4\pi\Delta)^2} \cos^2\theta, \qquad (5.23)$$

где r — отношение интенсивности рассеянного света к первоначальной интенсивности, n — коэффициент преломления, v — удельный объем, λ — длина волны падающего света, Φ — объем облучаемого газа, Δ — расстояние до наблюдателя, θ — угол рассеяния. Для идеального газа ($n \approx 1$)

$$r = \frac{RT}{N} \frac{(n^2-1)^2}{p} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{\Phi}{(4\pi\Delta)^2} \cos^2\theta. \qquad (5.24)$$

«[Соотношение (5.24)] можно также получить, суммируя излучение отдельных молекул газа, предполагая, что последние распределены совершенно беспорядочно». Таким образом, Эйнштейн обнаружил, что связь между критической опалесценцией и рэлеевским рассеянием является количественной, и тем самым вновь (уже в последний раз) получил метод определения постоянной Авогадро. Как указано в книге Перрена «Атомы», соответствующие измерения были выполнены через небольшой промежуток времени после выхода работы Эйнштейна.

Смолуховского этот результат обрадовал. В опубликованной в 1911 г. статье он назвал вклад Эйнштейна «значительным ша-

гом вперед» [S9]. Однако он не совсем правильно понял аргументацию Эйнштейна. В приложении к статье 1911 г. Смолуховский пишет, что голубой цвет неба вызван двумя факторами: рассеянием на молекулах и рассеянием в результате флуктуаций плотности. В своем письме [E19] Эйнштейн высказал возражение против такого толкования. Рассеяние объясняется одной-единственной причиной: «Рэлей рассматривает частный случай нашей задачи, и согласие между результатами его окончательной формулы и моими расчетами отнюдь не случайно». Вскоре после этого Смолуховский ответил: «Вы совершенно правы» [S10].

Смолуховский хотел также экспериментально исследовать эту проблему — он предполагал воспроизвести голубизну неба в лаборатории. Первые результаты выглядели довольно многообещающе [S11], и Смолуховский задумал более детальные эксперименты. Осуществлению этого замысла помешала смерть [21]).

После смерти Смолуховского Зоммерфельд [S12] и Эйнштейн [E16] опубликовали некрологи, в которых воздавалось должное этому крупному ученому и прекрасному человеку. Эйнштейн назвал его остроумным ученым, а также благородным, тонким и благожелательным человеком.

Подводя итог, можно сказать следующее. Работы Эйнштейна о критической опалесценции и голубом цвете неба была написана в октябре 1910 г. Она была прислана из Цюриха, где он занимал в то время должность экстраординарного профессора университета. Это была его последняя крупная работа в области классической статистической физики. В марте 1911 г. он переехал в Прагу, где впервые получил должность профессора физики и начал массированное наступление на общую теорию относительности.

В 1908 г. сдался Оствальд. Ссылаясь на эксперименты по броуновскому движению и открытие электрона, он заявил, что они «...позволяют даже осторожному ученому говорить об экспериментальном подтверждении атомного строения вещества» [O3].

Мах скончался в 1916 г. необращенным [22]).

Перрен за свои работы по броуновскому движению получил в 1926 г. Нобелевскую премию. В его книге «Атомы», одной из лучших работ по физике, написанных в XX в., в классическом французском стиле дана окончательная оценка перипетиям борьбы за молекулярную теорию: «Атомная теория восторжествовала. Некогда многочисленные, ее противники повержены и один за другим отрекаются от своих взглядов, в течение столь долгого времени считавшихся обоснованными и полезными».

---

[21]) О более поздних экспериментальных работах по критической опалесценции см., например, [C7]. Проблемы современной теории критической опалесценции обсуждаются в обзоре [M8].

[22]) Стефан Мейер вспоминает, как Маху продемонстрировали в Вене сцинтилляции, вызванные α-частицами. Мах при этом сказал: «Теперь я верю в атомы» [M9]. Однако книга по оптике, написанная после его отъезда из Вены [M10], показывает, что эта вера прожила недолго.

Глава 6. «ТВОРЕЦ ИЗОЩРЕН...»

§ 6.1. Эксперимент Майкельсона — Морли

Статья Максвелла «Эфир», написанная для девятого издания Британской энциклопедии [M1], начинается с перечисления «...метафизических... и земных функций, которые призван выполнять эфир». Далее с плохо скрытой иронией он пишет, что лишь для чисто научных целей «...все пространство три, а то и четыре раза заполнено эфиром». Эта статья Максвелла представляется очень важной по ряду причин. Перечислим лишь три из них. Максвелл, как и все его современники, был глубоко убежден в реальности эфира: «Не может быть сомнений в том, что межпланетное и межзвездное пространство не является пустым, а заполнено некой материальной субстанцией или телом, несомненно, наиболее крупным и, возможно, самым однородным из всех известных тел». Здесь же говорится о безуспешных попытках самого Максвелла выполнить наземные оптические опыты для определения влияния увлечения эфира на движение Земли. При этом он отмечает, что, по его мнению, эффекты порядка v/c (v — скорость движения Земли по отношению к эфиру, c — скорость света) слишком малы, чтобы можно было их обнаружить. В связи с последним замечанием он добавляет, что «...все методы, ...позволяющие определить скорость света в наземных экспериментах, на практике сводятся к измерению времени прохождения светом двойного пути между двумя объектами» и дают погрешность порядка $O((v/c)^2)$, т. е. около 10^{-8}.

Все же Максвелл надеялся, что эффекты первого порядка удастся обнаружить в ходе астрономических наблюдений. В качестве примера он дал метод определения скорости света при наблюдении затмений спутников Юпитера, когда Юпитер находится практически на противоположной от Земли стороне эклиптики. Если определить эфир [1]) так, как его представлял себе Максвелл или Огюстен Жан Френель,— как среду, находящуюся в состоянии абсолютного покоя по отношению к неподвижным звездам, через которую Земля движется так, как если бы она

[1]) Обзор теорий и моделей эфира см. в [L1, S1].

была прозрачной для эфира, то можно легко увидеть, что при наблюдении за Юпитером эффект, если он вообще существует, должен быть первого порядка относительно скорости Солнечной системы при ее движении в эфире.

Максвелл запросил данные о системе Юпитера у Дэвида Пека Тодда, директора Вашингтонского бюро морских альманахов. В письме от 19 марта 1879 г. Максвелл поблагодарил Тодда за предоставление информации, упомянул о своей статье в энциклопедии и, в особенности, подчеркнул соображения по поводу эффектов второго порядка при наземных экспериментах. Это письмо (не включенное в его избранные труды) было написано, когда Максвеллу оставалось жить менее восьми месяцев, а Эйнштейну исполнилось пять дней. После смерти Максвелла письмо было направлено секретарю Королевского общества, который распорядился опубликовать его в журнале «Nature» [M2].

Спустя полтора года, в августе 1881 г., в журнале «American Journal of Science» вышла статья, автором которой был Альберт Абрахам Майкельсон, магистр наук, служащий ВМФ США. Майкельсон к тому времени уволился из флота и работал над диссертацией в лаборатории Гельмгольца в Берлине. В 1879 г. он прочел письмо Максвелла. Будучи признанным специалистом по измерению скорости света (к тому времени им были опубликованы на эту тему уже три статьи [L2]), Майкельсон пришел к выводу, что Максвелл недооценил точность наземных экспериментов. Прибор, который он спроектировал в Берлине для определения предсказанных Максвеллом эффектов второго порядка, носит название интерферометра Майкельсона. Для того чтобы сотрясения грунта, неизбежные в большом городе, не мешали измерениям, Майкельсон проводил эксперименты в астрофизической лаборатории в соседнем Потсдаме. В методе, который он использовал, сравнивались времена, необходимые свету для того, чтобы пройти заданное расстояние сначала параллельно, а затем перпендикулярно к направлению движения Земли относительно эфира. На его установке неподвижный эфир должен был давать разницу во времени, соответствующую примерно 1/25 длины волны желтого света; этот эффект можно было обнаружить в результате интерференции поперечного и продольного пучков света. Более подробно о его опыте можно прочесть в учебниках [2]), поэтому я сразу приведу вывод Майкельсона: эфирный ветер не наблюдался. «Итак, было продемонстрировано, что результат, предсказываемый гипотезой неподвижного эфира, не наблюдается, откуда с необходимостью следует вывод о том, что данная гипотеза ошибочна» [M3].

В начале 1887 г. Майкельсон написал Рэлею о том, что он «...обескуражен тем, насколько мало внимания привлекла эта работа» [M4] [3]). Его замечание можно признать справедливым

---

[2]) См., например, [P1].

[3]) Подробно о переписке Майкельсона с Рэлеем рассказано в [S2, H1].

только в отношении числа ученых, обративших на нее внимание, но не в отношении их роли в науке. И Кельвин, и Рэлей, с которыми Майкельсон встретился в Университете Джона Хопкинса в 1884 г. [S3], несомненно, уделили ей должное внимание. Это же относится и к Лоренцу, который нашел ошибку в теории опыта Майкельсона [L3] и с сомнением отнесся к толкованию его результата [L4]. Недоверие Лоренца и настоятельные призывы Рэлея заставили Майкельсона (работавшего в то время в Институте прикладных наук Кейса в Кливленде) повторить свой опыт, на этот раз в сотрудничестве с Эдвардом Уильямсом Морли, химиком из соседнего университета Вестерн-Ризерв. Исходя из идеи потсдамского эксперимента, они построили новый интерферометр, в конструкции которого особое внимание уделялось сведению к минимуму внешних воздействий. В августе 1887 г. Майкельсон написал Рэлею, что вновь получен отрицательный результат [M5]. Статья об опыте Майкельсона — Морли вышла в ноябре того же года [M6]. Вполне понятно, что отрицательный результат огорчил не только авторов эксперимента, но и Кельвина, Рэлея и Лоренца.

И все же, несмотря ни на что, этот экспериментальный результат был сочтен достоверным. Значит, ошибка кроется в теории. В 1892 г. Лоренц спрашивал у Рэлея: «Не могло ли случиться так, что какой-то момент в теории опыта господина Майкельсона был упущен из вида?» [L5]. В лекции, прочитанной 27 апреля 1900 г. в Королевской ассоциации, Кельвин отозвался об этом опыте как о «...выполненном с максимально возможной тщательностью, обеспечивающей достоверность полученного результата» и охарактеризовал его исход как облачко на горизонте динамической теории света XIX в. [K1]. В 1904 г. он написал в предисловии к своим балтиморским лекциям: «Майкельсон и Морли своей выдающейся экспериментальной работой о движении эфира относительно Земли выдвинули единственное серьезное возражение против нашего динамического подхода...» [K1, с. VI].

Позднее Майкельсон неоднократно повторял свой опыт, последний раз в 1929 г. [M7]. Этим занимались и некоторые другие, в частности Дайтон Кларенс Миллер, работавший одно время вместе с Майкельсоном в Кливленде. В 1904 г. Морли и Миллер впервые поставили опыт на высокогорье: «Некоторые полагали, будто [опыт Майкельсона — Морли] доказывает лишь, что эфир в подвальном помещении оказывается вовлеченным в движение. В связи с этим мы решили поместить установку на вершине горы, с тем чтобы проверить, наблюдается ли эффект в этом случае» [M8][4]). В статьях, вышедших в 1933 [M9] и в 1955 гг. [S4], содержится много технических деталей и исторических сведений об этих опытах. Наибольший вклад в сбор исторических данных внес Роберт С. Шенкланд, ссылки на работы которого

[4]) Ранее Майкельсон указал на возможность захвата эфира в подвальном этаже, где проводился опыт [M4].

часто встречаются в этом разделе. Пока нет необходимости говорить о том, что было дальше, за исключением одного события, в котором непосредственно участвовал Эйнштейн.

Второго апреля 1921 г. Эйнштейн впервые приехал на два месяца в Соединенные Штаты. В мае он прочитал четыре лекции по теории относительности в Принстонском университете [E1]. В это время в Принстоне появились слухи о том, что во время предварительных экспериментов, проводившихся Миллером с 8 по 21 апреля в обсерватории Маунт-Вилсон [S4], якобы получен ненулевой результат. Услышав об этом, Эйнштейн сказал: «Творец изощрен, но не злонамерен». Как бы то ни было, 25 мая 1921 г., незадолго до отъезда из США, Эйнштейн посетил Миллера в Кливленде, где они обсудили этот вопрос [S5].

К этому можно сделать два дополнения. Одно касается вещей преходящих. Двадцать восьмого апреля 1925 г. Миллер прочел доклад перед Национальной академией наук в Вашингтоне, в котором сообщалось, что наличие эфирного ветра установлено окончательно и бесповоротно [M10]. В том же году, покидая пост президента Американского физического общества, в речи в Канзас-сити он вновь заявил о том же [M11]. В результате Миллер получил премию в тысячу долларов от Американского общества за прогресс в науке [L6] (видимо, как выражение того сопротивления, которое оказывалось еще в определенных кругах теории относительности [B1]), в то время как Эйнштейна завалили телеграммами и письмами с просьбой высказать свое мнение. О его реакции на всю эту шумиху можно судить по замечанию, сделанному им, между прочим, в письме Бессо: «Я ни на минуту не принимал [результатов Миллера] всерьез» [E2][5]). Сейчас квантовая теория поля радикально изменила наши представления о вакууме, но они не имеют ничего общего с концепцией эфира XIX в., почившей на вечные времена[6]).

Второе дополнение касается события, не прошедшего бесследно. Освальд Веблен, профессор математики в Принстоне, услышал замечание Эйнштейна об изощренности «творца». В 1930 г. Веблен обратился к Эйнштейну с просьбой разрешить высечь это изречение на плите над камином в общем зале «Файн холл» математического отделения университета [V1]. Эйнштейн согласился[7]). Математический факультет позднее переехал в новое здание, но выбитая в камне надпись осталась на старом месте — в комнате 202, бывшем «Файн холле».

---

[5]) В 1927 г. Эйнштейн заметил, что положительный эффект, обнаруженный Миллером, мог быть связан с очень малыми перепадами температуры во время экспериментов [E2a].

[6]) В 1951 г. Дирак в течение непродолжительного времени подумывал о возвращении к эфиру [D1].

[7]) В ответе Веблену Эйнштейн дал такое толкование своего изречения: «Природа хранит свои секреты по причине возвышенности ее устремлений, а не из коварства» [E3]. В июне 1966 г. Элен Дюкас подготовила памятную записку с изложением этого эпизода [D2].

Вернемся к тем временам, когда Эйнштейн был почти неизвестен, и посмотрим, как отнесся Майкельсон к специальной теории относительности и какое влияние оказал опыт Майкельсона — Морли на создание Эйнштейном в 1905 г. СТО.

Ответить на первый вопрос несложно. Майкельсон, гений экспериментальной техники, чувствовал себя неуютно в вопросах теории относительности, что не помешало ему в 1907 г. стать первым американским ученым, удостоенным Нобелевской премии. Отсутствие упоминания эфирного ветра в официальном тексте его представления не должно вызывать удивления[8]). Теория относительности была еще совсем молода; даже 15 лет спустя о ней ничего не было сказано в официальном представлении Эйнштейна. Интересно, что и сам Майкельсон не упомянул об этих опытах в своей речи во время вручения премии [N1], в отличие от Эйнштейна, который на церемонии вручения ему Нобелевской премии в 1922 г., премии, присужденной за объяснение фотоэлектрического эффекта, выступил с речью, посвященной теории относительности [E4]. Отношение Майкельсона к теории относительности с особой яркостью отражено в его вышедшей в 1927 г. книге «Оптические исследования» [M12]. В ней он отметил, что теория относительности «...должна быть принята всеми», и четко изложил преобразования Лоренца с учетом их влияния на опыт Майкельсона — Морли, а также на опыт Армана Ипполита Луи Физо, измерявшего скорость света в потоке воды. За этим следует резюме: «Похоже, что существование эфира не согласуется с указанной теорией... Но как же объяснить распространение световых волн без наличия среды? ...Как объяснить постоянство скорости их распространения, это фундаментальное предположение (по крайней мере, в СТО), если нет никакой среды?».

Это не жалоба одного человека, это — жалоба эпохи, которая к моменту публикации книги Майкельсона уже доживала свой век. Слова Майкельсона прекрасно иллюстрируют два основных положения, о которых пойдет речь в этой и двух последующих главах. Во-первых, на раннем этапе легче было понять математику, чем физику СТО. Во-вторых, было не так просто привыкнуть к тому, что на смену старой динамике эфира пришла новая кинематика.

Посмотрим теперь, какое влияние оказал опыт Майкельсона — Морли на первую работу Эйнштейна по теории относительности [E5]. И дело здесь не только в том, нужно ли было Эйнштейну сделать где-то соответствующую ссылку. Важно то, что ответ поможет нам глубже проникнуть в ход мыслей Эйнштейна и тем самым подготовиться к обсуждению коренных различий между подходами Эйнштейна, Лоренца и Пуанкаре.

---

[8]) Текст представления гласит: «За создание прецизионных оптических приборов, а также за спектроскопические и метрологические измерения, выполненные с их помощью» [N1].

Майкельсон не упоминается ни в первой, ни в других ранних статьях Эйнштейна, посвященных СТО. Не найти его имени и в автобиографических заметках Эйнштейна 1949 г. [E6], где он рассказывает об эволюции своих научных взглядов и упоминает ряд ученых, оказавших на него влияние. Однако это молчание ни в коей мере не свидетельствует о том, что Эйнштейн недооценивал важность данного опыта. В 1907 г. Эйнштейн написал обзорную статью по теории относительности [E7], где впервые взял на себя труд дать довольно подробную библиографию. Майкельсон и Морли упоминаются в этом обзоре, в статье 1915 г. [E8], в принстонских лекциях 1921 г. [E1] и в книге «Сущность теории относительности» [E9] (в основу которой положены принстонские лекции), где Эйнштейн называет опыт Майкельсона — Морли наиболее важным из всех опытов, показавших отсутствие эфирного ветра.

Однако ни в своих ранних статьях, ни в этих четырех обзорах Эйнштейн не сообщает о том, знал ли он об опыте Майкельсона — Морли до 1905 г. Не помогает разобраться в этом и переписка. Я разыскал лишь одно письмо Майкельсона Эйнштейну, написанное в 1923 г. [M13], но не нашел ни одного письма Эйнштейна Майкельсону. В упомянутом письме декан физического факультета Чикагского университета Майкельсон предлагает Эйнштейну должность профессора в Чикаго. О научных проблемах речь в нем не идет. Личная встреча их состоялась, наконец, в Пасадене. Их отношения были проникнуты теплотой и взаимным уважением, как мне сообщила Элен Дюкас, сопровождавшая семью Эйнштейнов в Калифорнию. На обеде, данном 15 января 1931 г. в честь Эйнштейна в Калифорнийском технологическом институте, он в первый и последний раз публично обратился к Майкельсону: «Я пришел к тем, кто в течение многих лет были моими верными друзьями и сопутствовали мне в моей работе. Вы, уважаемый д-р Майкельсон, начали эту работу, когда я был совсем маленьким мальчиком меньше трех футов ростом. Именно Вы указали физикам новые пути и своей замечательной экспериментальной работой проложили путь развитию теории относительности. Вы нанесли непоправимый урон существовавшей тогда теории эфира и способствовали появлению идей Лоренца и Фицджералда, из которых впоследствии развилась специальная [а затем и общая] теория относительности [и теория гравитации]» [E10]. Если бы Эйнштейн считал, что это приличествует случаю, то он поставил бы себя в один ряд с Лоренцем и Фицджералдом. Он достаточно хорошо разбирался в людях, чтобы понимать, что это было бы воспринято как дополнительный комплимент Майкельсону, а не как нескромность.

Во время этого парадного обеда Майкельсон был уже очень болен и спустя четыре месяца скончался. Вернувшись в Берлин, Эйнштейн почтил память Майкельсона в выступлении перед Физическим обществом 17 июля 1931 г. [E11]. Свое выступление он закончил такой историей. В Пасадене Эйнштейн спросил Май-

кельсона, почему он потратил столько сил на требующие огромной точности измерения скорости света. Майкельсон ответил: «Потому что меня это забавляет». Об опыте Майкельсона — Морли Эйнштейн заявил следующее: «Именно это негативное открытие в значительной мере способствовало признанию правильности теории относительности». Даже в этом случае, когда, казалось бы, нельзя было поступить иначе, Эйнштейн не признал непосредственного влияния работ Майкельсона на ход его мыслей.

Но как бы то ни было, на вопросы, знал ли Эйнштейн о работе Майкельсона до 1905 г. и повлиял ли опыт Майкельсона — Морли на создание СТО, нужно, без всякого сомнения, ответить утвердительно. Это следует из беседы Шенкланда с Эйнштейном в 50-е годы, а также из лекции «Как я создал теорию относительности», прочитанной Эйнштейном 14 декабря 1922 г. в университете города Киото, Япония. (В дальнейшем она будет упоминаться как «киотская лекция».) Коснусь сначала двух заявлений Эйнштейна, сделанных в беседах с Шенкландом и записанных последним вскоре после этого (немного позднее они были опубликованы [S6]), а также письма Эйнштейна Шенкланду [S7] [9]).

А. Беседа, состоявшаяся 4 февраля 1950 г. «Когда я спросил Эйнштейна, как он узнал об опыте Майкельсона — Морли, он ответил, что прочитал о нем в работах Лоренца, но обратил на него внимание *лишь после 1905 г.!* „В противном случае,— сказал он,— я бы упомянул о нем в своей статье". Он также сказал, что из экспериментальных результатов наибольшее влияние на него оказали наблюдения аберрации звезд и опыты Физо по измерению скорости света в потоке воды. „Этого было достаточно",— сказал Эйнштейн» [S6].

Б. Беседа, состоявшаяся 24 октября 1952 г. «Я спросил профессора Эйнштейна, когда он впервые услышал о Майкельсоне и его опыте. Он ответил: „Трудно сказать, когда я впервые услышал об опыте Майкельсона. Я не ощущал его прямого влияния в течение тех семи лет, когда жил теорией относительности. Видимо, я просто считал его результат само собой разумеющимся". Однако Эйнштейн отметил, что с 1905 по 1909 г. он много думал о полученном Майкельсоном результате, обсуждал его с Лоренцем и другими, размышлял над общей теорией относительности. Потом он понял, что знал о результате Майкельсона и до 1905 г., так как читал работы Лоренца, но в основном просто полагал, что этот результат верен» [S6].

В. Декабрь 1952 г., письмо Эйнштейна Шенкланду. «Влияние решающего эксперимента Майкельсона — Морли на меня было довольно косвенным. Я узнал о нем из основополагающего труда

---

[9]) Это письмо, написанное по просьбе Шенкланда, было прочитано на торжественном заседании Физического общества Кливленда, посвященном 100-летию со дня рождения Майкельсона.

Г. А. Лоренца, посвященного электродинамике движущихся тел (1895), с которым познакомился до начала разработки специальной теории относительности. Основная посылка Лоренца о существовании покоящегося эфира представлялась мне неубедительной как сама по себе, так и из-за того, что она приводила к казавшемуся мне искусственным толкованию результата эксперимента Майкельсона — Морли» [S7].

Какой же вывод можно сделать из этих высказываний?

Во-первых, что память — штука ненадежная. (Эйнштейн был уже нездоров в 1950—1952 гг. и знал, что жить ему осталось недолго.) Имеется явное несоответствие между словами Эйнштейна, сказанными в феврале 1950 г., и двумя последующими заявлениями. Видимо, имеет смысл больше доверять последним свидетельствам, поскольку они были сделаны после некоторого размышления, и на основании этого заключить, что Эйнштейн действительно знал об опыте Майкельсона — Морли до 1905 г. Отсюда также можно сделать вывод о том, что к устным рассказам следует относиться с вниманием и осторожностью.

Во-вторых, Эйнштейн сказал, что знания об аберрации и опытах Физо ему было достаточно. *Это наиболее важное из всех высказываний Эйнштейна об истоках СТО.* Оно свидетельствует о том, что его основным намерением, приведшим в конце концов к созданию теории относительности, было не стремление устранить противоречие между результатом опыта Майкельсона — Морли и теориями эфира, господствовавшими в XIX в., а отрицание, *вне зависимости от опыта Майкельсона — Морли*, построений науки прошлого столетия, как лишенных внутренней убедительности и потому искусственных.

Для того чтобы полностью оценить, насколько радикальным был отход Эйнштейна от прежних взглядов, необходимо сравнить его позицию с «основополагающим» трудом, опубликованным Лоренцем в 1895 г. [L4]. В § 64 читаем следующее заявление, выделенное курсивом самим Лоренцем: «*В соответствии с нашей теорией, движение Земли никогда не будет давать эффектов первого порядка* [относительно v/c] *в экспериментах, проводимых с наземными источниками света*». По признанию самого Эйнштейна, он знал о работе Лоренца 1895 г., в которой тот, среди прочего, обсуждал как аберрацию света, так и опыт Физо. Напомним, *что* было поставлено на карту. Из-за того, что Земля имеет скорость v, звезда, которая находилась бы в зените, если бы Земля покоилась, смещена от вертикали на угол α, где

$$\operatorname{tg} \alpha = v/c. \qquad (6.1)$$

Понятие о находящемся в абсолютном покое эфире, введенное в 1818 г. Френелем в его знаменитом письме Доминику Франсуа Жану Араго [F1], было предложено им специально для того, чтобы объяснить это явление аберрации (аберрация была бы равна нулю, если бы эфир двигался вместе с Землей). Рассматривая эффект Физо, Френель предсказал, что если жидкость движется

в трубке со скоростью v относительно эфира и в ней в том же направлении распространяется свет, то результирующая скорость света c' в лабораторной системе отсчета задается выражением

$$c' = c/n + v(1 - 1/n^2), \qquad (6.2)$$

где n — показатель преломления жидкости (предполагается, что свет в жидкости не рассеивается). Френель получил этот результат, предположив, что свет при прохождении через эфир вызывает в нем упругие колебания. По его мнению, наличие множителя $(1 - 1/n^2)$, известного сейчас как коэффициент увлечения Френеля, отражает тот факт, что свет не может приобрести полную дополнительную скорость v из-за того, что он частично задерживается находящимся в трубке эфиром. В 1851 г. Физо провел опыт с распространением света наземного источника в потоке движущейся жидкости и обнаружил неплохое совпадение результатов с уравнением (6.2) [F2].

Лоренц обсудил оба эти эффекта с позиций электромагнитной теории и дал динамический вывод формулы увлечения Френеля, рассмотрев поляризацию среды, вызываемую падающими электромагнитными волнами [10]). В этой работе 1895 г. существование эфира Френеля постулировано в явном виде. Отвергнув такие объяснения аберрации и опыта Физо, Эйнштейн покинул твердую почву эффектов первого порядка, на которой прочно расположились ограниченные числом, но в высшей степени заслуженные и влиятельные сторонники электромагнитной теории. Причины, по которым он решил поступить именно так, будут обсуждаться в следующей главе. А пока отметим, что как только новый взгляд на эффекты первого порядка заставил применить новую логику СТО, результат опыта Майкельсона — Морли действительно можно было считать само собой разумеющимся (как неоднократно говорил Эйнштейн). Повторим также, что этот опыт подробно обсуждался в работе Лоренца 1895 г. и что Эйнштейн был знаком с ней до 1905 г.!

Наконец, была лекция Эйнштейна в Киото. Она читалась на немецком, а на японский ее переводил Джун Ишивара [11]) [11]. Часть японского текста затем была переведена на английский [O1]. Ниже приведено несколько строк из английского перевода: «Еще студентом я познакомился с необъяснимыми результатами опыта Майкельсона и интуитивно пришел к выводу, что, возможно, мы ошибаемся, считая, будто Земля движется относительно эфира, так как опыт не подтверждает этого. По сути, так я пришел к тому, что сейчас именуется СТО... К тому времени я был знаком лишь с монографией Лоренца 1895 г., в которой ему удалось дать полное решение задач электродинамики в первом приближении, или, иными словами, в случае, когда не учитыва-

[10]) Соответствующие выкладки приведены в книге [P1, с. 174].

[11]) С 1912 по 1914 г. Ишивара изучал физику в Германии и Швейцарии. Тогда он и познакомился с Эйнштейном. Перевел на японский ряд работ Эйнштейна.

ются члены более высокого порядка, чем квадрат отношения скорости движущегося тела к скорости света. В этой связи я обратил также внимание на опыт Физо...».

В своей первой статье по теории относительности Эйнштейн упоминает «...неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно „светоносной среды“», не говоря, какие попытки он имел в виду[12]). Хотя Эйнштейн знал и об эксперименте Майкельсона, и об опыте Физо, ни тот, ни другой не упоминаются. Возможно, неудовлетворенность Эйнштейна объяснениями эффектов первого порядка отодвинула загадку отрицательного результата для членов второго порядка в опыте Майкельсона — Морли на задний план. Тем не менее, «необъяснимый результат» Майкельсона все-таки повлиял на его мышление, и тут возникает новый вопрос: «Почему же тогда Эйнштейн с такой сдержанностью говорил о том влиянии, которое оказал на него результат Майкельсона?». Я вернусь к этому вопросу в гл. 8.

§ 6.2. Предшественники

Что знал Эйнштейн. В исторических исследованиях, посвященных теории электромагнетизма конца XIX в., неизменно цитируется фраза, сказанная блестящим физиком-теоретиком и экспериментатором Генрихом Рудольфом Герцем: «Теория Максвелла — это система уравнений Максвелла»[13]). Сама по себе эта фраза — остроумное, броское, но лишенное смысла высказывание о величайшем достижении физики того времени. В период между Максвеллом и Эйнштейном утвердилось мнение о том, что электродинамика есть уравнение Максвелла плюс выражения для плотности зарядов и токов, входящих в эти уравнения, плюс гипотеза о существовании эфира.

В теории Максвелла центральная роль отводилась концепции поля. Эфир продолжал в ней присутствовать, но в гораздо более простом виде. Пространство уже не было «...три, а то и четыре раза заполнено эфиром» [M1]. Как писал в 1893 г. Кельвин: «Многие труженики и мыслители помогли выработать в XIX в. понятие „пленума“ — одного и того же эфира, служащего для переноса света, теплоты, электричества и магнетизма» [H4, с. XV]. Однако в XIX в. все еще была масса кандидатов на звание этого единого эфира, причем многие из них, хотя и не все, были предложены еще до Максвелла. Были эфиры Френеля, Коши, Стокса, Неймана, Мак-Кулага, Кельвина, Планка и, возможно, другие, отличавшиеся друг от друга такими свойствами, как степени однородности и сжимаемости, а также тем, насколь-

---

[12]) В содержательной статье об Эйнштейне и опыте Майкельсона — Морли Холтон [H2] предполагает, что, возможно, Эйнштейн имел в виду и другие известные к тому времени отрицательные результаты, такие как отсутствие двойной рефракции [B2, R1] и опыт Троутона — Нобля [T1].

[13]) См. т. 2 избранных трудов Герца [H3], имеющийся также в переводе на английский [H4].

ко они увлекались Землей. Этим в основном, хотя и не полностью, объясняется наличие большого числа постмаксвелловских «теорий Максвелла» — теорий Герца, Лоренца, Лармора, Вихерта, Кона и некоторых других.

Герц, естественно, знал обо всех этих теориях [М14], ведь ему также пришлось выбирать собственный эфир (его эфир увлекался Землей). Полностью его афоризм звучит так: «Теория Максвелла — это система уравнений Максвелла. Любую теорию, приводящую к той же системе уравнений и, следовательно, описывающую те же возможные явления, я бы рассматривал как вариант или частный случай теории Максвелла».

Наиболее важной проблемой, которую нужно было решить всем этим создателям эфиров и творцам «теорий Максвелла», было динамическое объяснение аберрации света, теории увлечения Френеля и, позднее, опыта Майкельсона — Морли. В широком смысле все они были предшественниками Эйнштейна, показавшего, что стоявшая перед ними задача была невыполнимой и, более того, что ее вообще не нужно было ставить. Теория Эйнштейна, конечно же, не является еще одной теорией Максвелла, как ее понимал Герц. Его теория позволила разрешить трудности электродинамики движущихся тел во всеобъемлющих рамках новой кинематики. Пойдя дальше Лоренца и Пуанкаре, Эйнштейн впервые положил в основу теории фундаментальный пересмотр проблемы измерений, знаменующий резкий разрыв с представлениями XIX в. (во второй раз он поступил так же в квантовой механике).

Я не собираюсь подробно останавливаться на изысканиях всех упомянутых ученых. Вместо этого мы детально рассмотрим труды Лоренца и Пуанкаре — предтеч новой кинематики. Мы вернемся к рассмотрению достижений Эйнштейна, Лоренца и Пуанкаре в гл. 8. Я не буду также касаться самого важного результата Лоренца — атомистического толкования уравнений Максвелла с использованием зарядов и токов, переносимых фундаментальными частицами (которые он называл заряженными частицами в 1892 г., ионами в 1895 г. и, наконец, электронами в 1899 г.), хотя эта работа была крупным шагом вперед в развитии электродинамики. Вместо этого я ограничусь в основном выводом и толкованием преобразований Лоренца:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma(t - vx/c^2), \tag{6.3}$$

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}, \tag{6.4}$$

связывающих одну систему координат пространства-времени (x', y', z', t') с другой (x, y, z, t), движущейся с постоянной скоростью v относительно первой. (При рассмотрении этого вопроса здесь можно ограничиться учетом относительного движения лишь в направлении оси x.)

Основными действующими лицами нашего рассказа будут: Фогт, первым записавший преобразование Лоренца; Фицджеральд, первым предложивший гипотезу сокращения; Лоренц; Лармор,

первым связавший гипотезу сокращения с преобразованиями Лоренца, и, наконец, Пуанкаре. Следует также отметить, что к 1900 г. и другие стали подозревать, что от эфира как материальной среды, возможно, придется отказаться. Так, Пауль Друде писал в 1900 г.: «Концепция находящегося в покое эфира наиболее проста и естественна, по крайней мере, в том случае, когда под эфиром понимается не какая-то субстанция, а пространство, наделенное определенными физическими свойствами» [D3]. А вот что писал в 1901 г. Эмиль Кон: «Среда такого рода заполняет все участки нашего пространства; ею может быть как некая весомая субстанция, так и вакуум» [C1].

Среди многих работ, написанных на данную тему, мне хотелось бы особо отметить следующие статьи: Тетю Хиросиге о проблеме эфира [H5], Мак-Кормака о Герце [M14], Борка [B3] и Браша [B4] о Фицджеральде и Миллера о Пуанкаре [M15].

Сам Эйнштейн в своей первой статье по теории относительности упоминает лишь трех физиков: Максвелла, Герца и Лоренца. Он неоднократно отмечал, что в 1905 г. знал о работах Лоренца, написанных до 1895 г. Отсюда, как мы увидим далее, следует, что в 1905 г. Эйнштейн не слышал о преобразованиях Лоренца. Он заново получил их самостоятельно. Не был он в то время знаком и с теми из статей Пуанкаре, в которых детально разбираются проблемы относительности.

Фогт. Вольдемар Фогт в 1887 г. показал [V2], что уравнения типа

$$\Box \varphi = 0, \tag{6.5}$$

$$\Box = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2 - \partial^2/c^2\partial t^2 \tag{6.6}$$

сохраняют форму при переходе к новым пространственно-временным переменным

$$x' = x - vt, \quad y' = y/\gamma, \quad z' = z/\gamma, \quad t' = t - vx/c^2. \tag{6.7}$$

Это и есть, с точностью до масштабного множителя, преобразования Лоренца (6.3). Фогт сообщил об этом результате в статье, посвященной эффекту Доплера. Из уравнений (6.7) он вывел доплеровское смещение, но лишь до давно известных членов порядка v/c. Его новый метод применяется и по сей день; в нем используется свойство инвариантности фазы плоской световой волны относительно выражений (6.7) [P1, с. 347; P3]. Так как доплеровское смещение является чисто кинематическим эффектом (с точки зрения СТО), для нас не имеет значения, что подход Фогта основан на давно забытой теории упругого распространения света, в соответствии с которой свет переносится колебаниями упругой несжимаемой среды.

Лоренц был знаком с некоторыми из работ Фогта. Около 1887 г. они даже переписывались по поводу опыта Майкельсона — Морли [V3]. Похоже, однако, что в течение длительного времени Лоренц не подозревал о преобразованиях Фогта [уравнениях (6.7)]. Действительно, в лекциях, прочитанных Лоренцем

в Колумбийском университете в 1906 г. и вышедших в виде книги в 1909 г., читаем: «В статье... опубликованной в 1887 г. и, к большому сожалению, не попавшей в поле моего зрения за все эти годы, Фогт применил к уравнениям... [вида (6.5)] преобразования, эквивалентные... [уравнениям (6.3)]. Идея преобразований [типа уравнений (6.3)]... может, таким образом, быть заимствована из работы Фогта, равно как и доказательство того, что они не изменяют вида уравнений при наличии *свободного* эфира» [L7]. (Отметим, что хотя эти строки написаны уже после появления работы Эйнштейна 1905 г., в них по-прежнему упоминается эфир. Не выделяется в этом смысле и второе издание книги Лоренца, вышедшее в 1915 г. Подробнее на эту тему мы поговорим в гл. 8.)

На одной из встреч физиков в 1908 г. Минковский особо упомянул о статье Фогта 1887 г. [M16]. Ответ присутствующего там Фогта был лаконичен: «...Еще тогда [в 1887 г.] был получен ряд результатов, к которым позднее удалось прийти на основе теории электромагнетизма» [V4].

Фицджералд. Избранные труды ирландского физика Джорджа Фрэнсиса Фицджералда, изданные его другом Джозефом Лармором [L8], демонстрируют, что Фицджералд принадлежал к той немногочисленной и избранной группе физиков, которая с самого начала принимала участие в развитии теории Максвелла. (В 1899 г. он был удостоен Королевской медали за работы в области оптики и электродинамики. Медаль была присуждена Королевским обществом, членом которого он состоял.) Однако в этом хорошо изданном томе нет коротенькой статьи, обессмертившей имя Фицджералда, той, в которой говорится о гипотезе сокращения движущихся тел. Эта статья появилась в 1889 г. в американском журнале «Science» [F3] под заголовком «Эфир и атмосфера Земли». Полный ее текст гласит: «С большим интересом я прочитал о поразительно тонких опытах господ Майкельсона и Морли, имевших целью ответить на важный вопрос о том, насколько эфир увлекается Землей. Похоже, что их результат противоречит другим опытам, демонстрировавшим, что увлечение эфира воздухом неуловимо мало. Поэтому я предлагаю гипотезу, позволяющую устранить возникшее противоречие: по мере движения материальных тел в эфире их длина изменяется пропорционально квадрату отношения их скорости к скорости света. Известно, что движение наэлектризованных тел по отношению к эфиру воздействует на электрические силы, вследствие чего представляется вероятным, что такое движение оказывает влияние и на молекулярные силы, из-за чего соответственно изменяются размеры тел. Было бы чрезвычайно важно выполнить наземные эксперименты по измерению сил электрического притяжения постоянно заряженных тел, например, использовать очень чувствительный квадрантный электрометр в районе экватора, с тем чтобы определить, имеются ли дневные и годичные колебания сил притяжения — дневные вызывались бы добавлением и

вычитанием орбитальной скорости, а годичные — изменением орбитальной скорости и движением Солнечной системы».

Здесь впервые встречается предложение о введении того, что мы сейчас называем сокращением Фицджеральда — Лоренца. Предложение сформулировано лишь качественно и в релятивистском духе. Рассмотрим следующее заявление: «...по мере движения материальных тел в эфире их длина изменяется...». Во-первых, по-прежнему (что совершенно естественно) присутствует эфир. Во-вторых, изменение длины рассматривается, пользуясь словами Эйнштейна, сказанными позднее, как объективная реальность; это абсолютное изменение, а не изменение по отношению к покоящемуся наблюдателю. Что касается предположения о влиянии движения на молекулярные силы, то автор, несомненно, имеет в виду *динамический* механизм сокращения, прижимающий молекулы друг к другу при их движении в эфире.

Гипотеза Фицджеральда неоднократно упоминалась в опубликованных позднее лекциях Оливера Джозефа Лоджа (см. [B3]). Лармор также воздал должное Фицджеральду во введении к его избранным трудам: «Он первым предположил... что движение в эфире влияет на размеры твердых молекулярных образований» [L8, с. VIII]. В той же книге мы читаем, что Фицджеральд говорил о гипотезе сокращения в 1900 г. Тогда вышло в свет эссе Лармора «Эфир и материя» [L9], и в рецензии на него Фицджеральд пишет о том, что при анализе опыта Майкельсона — Морли «...он [Лармор] вынужден предположить, что длина тела зависит от того, в продольном или в поперечном направлении движется оно по отношению к эфиру» [L8, с. 514], не упомянув, однако, о собственном предположении, сделанном более десяти лет назад!

Странное молчание Фицджеральда, возможно, отчасти объясняется фразой из письма его другу Оливеру Хевисайду: «...я совершенно не боюсь допустить ошибку и поэтому предлагаю самые сырые идеи в надежде, что они заставят задуматься других и тем будут способствовать движению вперед» [F4]. Может быть, его также сдерживало то, что он знал за собой свойство, о котором рассказал вскоре после его смерти Хевисайд: «У него, несомненно, был очень быстрый и чрезвычайно оригинальный ум. Это было и большим преимуществом, и бедой для его научной репутации. Он видел сразу слишком много путей. Мозг его был чересчур плодовит и изобретателен. Я думаю, для него было бы лучше, если бы он был немного поглупее — чуть медленнее соображал и был менее разносторонним, но зато более упорным. Тогда, возможно, кроме горстки ученых его оценили бы многие» [L8, с. XXVI].

Лоренц был одним из тех немногих, кто ценил Фицджеральда таким, каким он был.

Лоренц. Первая статья Лоренца, относящаяся к нашей теме, была написана в 1886 г. (до опыта Майкельсона — Морли); в ней он критиковал теорию потсдамского эксперимента Майкельсона 1881 г. [L3]. Основная цель данной статьи состояла в том,

чтобы проверить, насколько хорошо стационарный эфир Френеля удовлетворял наблюдавшимся явлениям. Для этого он повторно рассмотрел аберрацию и опыт Физо, а также особо отметил еще одно (ранее не упоминавшееся) достижение Майкельсона и Морли — повторение опыта Физо с гораздо более высокой степенью точности, что позволило проверить предсказанное Френелем значение коэффициента увлечения количественно [M17]. Так как в то время Лоренц испытывал понятные сомнения в точности потсдамского эксперимента, он заключил, что нет особых поводов для беспокойства: «Мне представляется сомнительным, чтобы гипотеза Френеля была опровергнута экспериментом» [L3].

В 1892 г. Лоренц опубликовал первую статью по своей атомистической теории электромагнетизма [L10]. К этому времени Майкельсон и Морли уже выполнили свой опыт, вызвавший (как упоминалось выше) серьезное беспокойство у Лоренца: «В течение долгого времени результат этого опыта оставался для меня загадкой, и в конце концов я смог придумать лишь один способ примирить его с теорией Френеля. Я предлагаю считать, что линия, соединяющая две точки твердого тела, первоначально параллельная направлению движения Земли, не сохраняет свою первоначальную длину при последующем повороте на 90°» [L11]. Если в окончательном положении эта длина равна l, то, отмечает Лоренц, гипотезу Френеля о существовании эфира удастся сохранить при условии, что длина в первоначальном положении была равна

$$l' = l(1 - v^2/2c^2). \qquad (6.8)$$

Сегодня мы называем уравнение (6.8) сокращением Фицджеральда — Лоренца второго порядка относительно v/c. При толковании этого результата Лоренц предположил, что молекулярные силы, как и электромагнитные силы, «...действуют через посредство эфира» и что эффект сокращения порядка $O(v^2/c^2)$ нельзя исключать на основе известных экспериментальных результатов.

Эти выводы очень хорошо согласуются с первоначальным предложением Фицджеральда, целью которого было спасти эфир, наделив его свойством динамического воздействия на молекулярные силы. Но в 1892 г. Лоренц еще не знал о той работе Фицджеральда.

Осенью 1894 г. Лоренц известил Фицджеральда о том, что он узнал о его гипотезе сокращения, прочитав статью Лоджа 1893 г. В этом же письме он информировал Фицджеральда о том, что пришел к такому же выводу в своей работе 1892 г., и попросил сообщить, где была опубликована его гипотеза, с тем чтобы можно было на нее сослаться [L12]. Спустя несколько дней Фицджеральд ответил: «Я послал статью в журнал „Science", но не знаю, была ли она опубликована... Нисколько не сомневаюсь, что Ваша работа вышла ранее каких-либо моих публикаций» (!) [F5]. Он также выразил удовлетворение тем, что Лоренц согласился с ним,

так как, по его словам, до этого над его идеей «весело посмеялись».

С этого момента Лоренц не упускал ни одного случая отметить, что Фицджеральд и он независимо пришли к идее сокращения. В работе 1895 г. он написал, что эта гипотеза, как он узнал позднее, «была предложена господином Фицджеральдом» [L4, разд. 89]. Эта работа знаменует также начало движения Лоренца по пути к выводу его преобразований, следующему предмету нашего обсуждения.

В статье 1895 г. Лоренц доказал «теорему соответственных состояний». Рассмотрим распределение немагнитного вещества в системе координат (x, t), покоящейся относительно эфира. Обозначим $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ и $\mathbf{D}$ напряженности электрического и магнитного полей и электрическую индукцию соответственно; $\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}$, где $\mathbf{P}$ — электрическая поляризация. Рассмотрим вторую систему координат (x', t'), движущуюся со скоростью v относительно первой. Тогда, до членов первого порядка по v/c, во второй системе должно быть такое соответственное состояние, в котором $\mathbf{E}'$, $\mathbf{H}'$, $\mathbf{P}'$ находятся в той же зависимости от x', t', что $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{P}$ от x, t, где

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \mathbf{v}t, \tag{6.9}$$

$$t' = t - \mathbf{v}x/c^2, \tag{6.10}$$

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{H}/c, \tag{6.11}$$

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \mathbf{v} \times \mathbf{E}/c, \tag{6.12}$$

$$\mathbf{P}' = \mathbf{P}.$$

Как и Фогт, Лоренц считал такие преобразования [уравнения (6.9), (6.10)] лишь удобным математическим приемом доказательства физического утверждения, в данном случае того, что до членов порядка $O(v/c)$ наземные оптические эксперименты не зависят от движения Земли, о чем уже говорилось в § 6.1. С уравнением (6.9) Лоренц, очевидно, был знаком раньше, но новое уравнение (6.10) привело его к очень важной новой терминологии. Он предложил называть t *общим временем*, а t' — *местным временем* [L4, разд. 31]. Хотя явно об этом не говорится, но, тем не менее, очевидно, что для него, так сказать, настоящим временем было только t. На данном этапе лоренцево объяснение отсутствия свидетельств существования неподвижного эфира являло собой некий гибрид — для членов первого порядка он использовал электродинамику, а для членов второго порядка ему пришлось вводить специальную гипотезу, выражаемую уравнением (6.8).

И последнее замечание к статье 1895 г. В ней содержится еще одно новшество — предположение о том, что на «ион» с зарядом e и скоростью v действует сила

$$\mathbf{K} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{H}/c) \tag{6.13}$$

— сила Лоренца (сам Лоренц назвал ее «электрической силой» [L4, разд. 31]).

Как уже неоднократно подчеркивалось, в 1905 г. Эйнштейну были известны лишь работы Лоренца, опубликованные к 1895 г. Таким образом, Эйнштейн знал лишь о следующем: о беспокойстве Лоренца по поводу опыта Майкельсона — Морли, о преобразованиях Лоренца «первого порядка» [уравнениях (6.9) и (6.10)], о доказательстве утверждения об оптических наблюдениях для членов первого порядка, о необходимости дополнения этого доказательства гипотезой сокращения и, наконец, о постулировании существования силы Лоренца [уравнение (6.13)].

В заключение краткого обзора работ Лоренца, написанных к 1905 г., необходимо упомянуть еще три его статьи.

В 1898 г. в лекции, прочитанной в Дюссельдорфе [L13], Лоренц рассказал о проделанной работе. Это резюме его статьей, написанных в 1895 г.

В 1899 г. Лоренц предложил «упрощенный вариант» своей ранней теории [L14]. Пять лет спустя он охарактеризовал эту работу следующим образом: «Было бы желательно показать при помощи неких фундаментальных предположений, не пренебрегая членами того или иного порядка, что многие электромагнитные воздействия совершенно не зависят от движения системы. Несколько лет тому назад [в 1895 г.] я попытался построить теорию такого рода» [L15]. В 1899 г. он записал следующие преобразования:

$$x' = \varepsilon\gamma(x - vt), \tag{6.14}$$

$$y' = \varepsilon y, \quad z' = \varepsilon z, \tag{6.15}$$

$$t' = \varepsilon\gamma(t - vx/c^2), \tag{6.16}$$

являющиеся, с точностью до масштабного множителя ε, преобразованиями Лоренца (6.3). Он отметил среди прочего: «...растяжения, определяемые... [уравнениями (6.14) и (6.15)], в точности такие, как те, что я был вынужден предположить для объяснения опыта господина Майкельсона». Таким образом, сведение сокращения Фицджеральда — Лоренца к серии преобразований Лоренца [14]) — достижение XIX в. Лоренц называл время t', определяемое уравнением (6.16), «измененным местным временем». В отношении масштабного множителя ε он заметил, что тот должен иметь совершенно определенное значение, которое можно установить, лишь «...глубже постигнув суть явления». Укажем, что для толкования результата опыта Майкельсона — Морли нет необходимости знать, что представляет собой ε. (Как и для всех оптических явлений в свободном пространстве, здесь допустимо требование не только лоренц-инвариантности, но и инвариантности масштаба, т. е., по сути, конформной инвариант-

[14]) Соответствующие математические выкладки см. в учебниках, например в [P1, гл. 15].

ности.) В 1899 г. Лоренц не рассматривал вопрос о том, может ли его теорема соответственных состояний быть приведена в согласие с преобразованиями (6.14) — (6.16).

В 1904 г. Лоренц, наконец, записал преобразования (6.3), (6.4) [L15]. Из рассмотрения свойств преобразования уравнений движения электрона во внешнем поле он заключил, что ε можно положить равным единице. В этот раз он попытался доказать теорему соответственных состояний (лоренц-ковариантность) для неоднородных уравнений Максвелла — Лоренца. При преобразовании уравнений для скоростей он допустил ошибку [L15, уравнение (8)], в результате чего не получил ковариантности для членов выше первого порядка по v/c (ср. уравнения (2) и (9) в [L15]).

В следующей главе мы вернемся к этой статье 1904 г. Но при рассмотрении развития истории релятивистской кинематики рассказ о Лоренце, как предшественнике Эйнштейна, можно на этом закончить.

Лармор. Эссе «Эфир и материя», за которое Лармор был удостоен премии [L9], было закончено в 1898 г. и вышло в свет в 1900 г. В нем содержатся не только правильные преобразования уравнений (6.3) и (6.4), но также и доказательство того, что с помощью этих преобразований можно получить сокращение Фицджеральда — Лоренца [L10, гл. 11]. Лармор был хорошо знаком со статьей Лоренца 1895 г. и подробно ее цитировал, но, конечно, не мог знать содержания его статьи 1899 г.

Следует отметить, что аргументация Лармора часто перегружена не представляющими здесь интереса рассуждениями о динамическом взаимодействии эфира с веществом. Однако не вызывает сомнения то, что он вывел преобразования Лоренца и получил выражение для сокращения независимо от Лоренца и раньше него. Любопытно, что ни в переписке [15]) Лармора с Лоренцем, ни в статьях Лоренца ни разу не упоминается об этом результате Лармора.

Впервые я услышал о работах Лармора в начале 50-х годов от Адриана Фоккера (ученика Лоренца). Оказывается, в Лейдене знали о том, что Лармор получил преобразования Лоренца раньше Лоренца. К сожалению, я так и не спросил Фоккера, что говорил по этому поводу сам Лоренц.

Пуанкаре. В 1898 г. Пуанкаре опубликовал очень примечательную статью под названием «Измерение времени» [P2]. В этой статье автор отметил: «*...мы не имеем непосредственной интуиции равенства двух промежутков времени.* Тот, кто думает, что обладает такой интуицией, обманут иллюзией». Далее он указал: «Трудно отделить качественную проблему одновременности от количественной проблемы измерения времени; при этом безразлично, будем ли мы пользоваться хронометром или учитывать

[15]) Эта переписка хранится в государственном архиве в Гааге. Я благодарен А. Кокс за предоставление информации об этой переписке.

скорость передачи, например скорость света, ибо невозможно измерить скорость, не *измерив* времени». Обсудив несовершенство предыдущих определений одновременности, Пуанкаре делает вывод о том, что «...одновременность двух событий или порядок их следования, равенство двух длительностей должны определяться так, чтобы формулировка естественных законов была по возможности наиболее простой. Другими словами, все эти правила, все эти определения — только плод неосознанного стремления к удобству». Эти строки звучат как генеральная программа. Спустя семь лет она получила конкретное воплощение. Из статьи также видно, что она написана в ответ на публикации последних лет, посвященные широко обсуждавшейся проблеме измерения временных интервалов. Пуанкаре внес в эту дискуссию новый элемент — он поставил под сомнение объективное содержание понятия одновременности.

В 1898 г. Пуанкаре не касался проблем электродинамики; о них он говорил в двух следующих работах — 1900 и 1904 гг. Эти статьи вновь звучат, как программа действий. В них центральное место отведено эфиру. «А наш эфир — существует ли он в действительности?»,— спрашивал Пуанкаре в выступлении на открытии Парижского конгресса 1900 г. [P3]. «Известно, откуда появилась уверенность в его существовании. Свету требуется несколько лет, чтобы дойти до нас от удаленной звезды. В это время он *уже* не находится на звезде и *еще* не находится на Земле. Надо допустить, что он где-то находится, что он имеет, так сказать, некоторый материальный носитель». Как он отмечает, в опыте Физо создается впечатление, что «...здесь вы касаетесь эфира пальцем». По поводу вопросов теории он отмечает, что «...наиболее удовлетворительной из всего, что мы имеем, является теория Лоренца [16])...». Однако он отметил как недостаток то, что независимость оптических явлений от движения Земли объясняется по-разному для членов первого и второго порядков. «Следует найти одно и то же объяснение для обоих случаев, и тогда естественно явится мысль, что то же будет иметь место равным образом и для членов высших порядков и что взаимное уничтожение всех членов [зависящих от скорости] будет точным и абсолютным». Его ссылка на это уничтожение, похоже, указывает на то, что он имел в виду скрытое влияние динамических эффектов.

В 1904 г. он снова вернулся к этому вопросу (и вновь в программном духе) во время выступления на Международном конгрессе искусства и наук в Сент-Луисе [P5, P6]. «Что такое эфир, как расположены его молекулы, притягиваются они или отталкиваются?» Кроме того, его смущало понятие абсолютной

---

[16]) В период с 1895 по 1900 г. Пуанкаре считал также недостатком данной теории и то, что в ней не удовлетворялся закон сохранения импульса в ньютоновом смысле, т. е. закон сохранения импульса только для вещества. Однако вскоре он снял свои возражения.

скорости: «Произведя то или иное измерение, мы всегда могли бы сказать: это де — не абсолютная скорость, и если это не скорость по отношению к эфиру, то всегда это может быть скорость относительно какой-то новой неизвестной жидкости, которой мы можем заполнить пространство». Затем он мягко упрекает Лоренца за «...нагромождение гипотез» и идет дальше него, рассматривая местное время как физическую концепцию. Пуанкаре рассматривает ситуацию с двумя наблюдателями, равномерно движущимися друг относительно друга и пытающимися синхронизировать свои часы при помощи световых сигналов. «Выверенные таким способом часы будут показывать не истинное время, а так называемое *местное время*». Каждому наблюдателю кажется, что у другого все явления протекают медленнее, причем это замедление одинаково для всех явлений, указывает Пуанкаре, и «...как следует из принципа относительности, [у наблюдателя] не будет никакого средства узнать, находится ли он в покое или в абсолютном движении». Пуанкаре осталось сделать лишь один шаг... Но нет, этот шаг не сделан: «Этого [подхода], к сожалению, недостаточно, *необходимы дополнительные гипотезы* (курсив мой.— *А. П.*); надо допустить, что движущиеся тела испытывают однородное сокращение в направлении движения». Упоминание о дополнительных гипотезах ясно показывает, что теория относительности еще не создана.

В заключение своего выступления Пуанкаре еще раз продемонстрировал поразительный дар предвидения: «Возможно... придется создать совершенно новую механику, которую мы сейчас лишь смутно предугадываем... в которой скорость света являлась бы непреодолимым пределом... Мы еще не дошли до этого; еще ничто не доказывает, что... [старые принципы] не выйдут из борьбы победоносными и неизменными».

Так на ноте неопределенности заканчивается рассказ о предшественниках Эйнштейна. Преобразования Лоренца получены; понятие одновременности поставлено под сомнение. Предположение о скорости света как верхнем пределе высказано. Но несмотря на это, до 1905 г. теория относительности так и не была создана. Посмотрим теперь, чем дальше занимался Пуанкаре уже не как предшественник Эйнштейна, а как ученый, работавший практически одновременно с ним.

§ 6.3. Пуанкаре в 1905 г.

Все три рассмотренные выше статьи являются по своему характеру качественными. Пуанкаре, один из немногих истинных лидеров в области математики и математической физики своего времени, конечно же, знал теорию электромагнетизма во всех ее тонкостях. В 1899 г. он опубликовал книгу по оптике [P7], а в 1901 г.— по теории электромагнетизма [P8]. В 1895 г. Пуанкаре напечатал серию статей по «теориям Максвелла» [P9], а в период с 1897 по 1900 г. написал несколько статей

по теории Лоренца [P10]. Кульминацией стали две работы, законченные им в 1905 г. Они имеют одинаковое заглавие: «О динамике электрона». Наличие слова «динамика» очень примечательно. Так же примечательна и следующая хронология: 5 июня 1905 г.— Пуанкаре докладывает первую из указанных статей в Академии наук в Париже [P11]; 30 июня 1905 г.— журнал «Annalen der Physik» получает первую статью Эйнштейна по теории относительности; июль 1905 г.— Пуанкаре заканчивает вторую статью, которая выходит в 1906 г. [P12].

Первая статья Пуанкаре является по сути резюме его второй работы, гораздо более пространной. Часть ее посвящена кинематике, часть — динамике. Здесь я остановлюсь лишь на кинематической части, отложив динамику на потом.

Июньская статья Пуанкаре начинается замечанием о том, что ни аберрация света и связанные с ней эффекты, ни опыт Майкельсона не дают прямых свидетельств абсолютного движения Земли. «Невозможность показать опытным путем абсолютное движение Земли представляет собой, по-видимому, общий закон природы». Затем Пуанкаре упомянул о гипотезе сокращения и о статье Лоренца 1904 г. [L15], в которой, по его мнению, Лоренцу удалось изменить эту гипотезу: «...она приведена в соответствие с *полной* невозможностью обнаружить абсолютное движение». Такое утверждение не совсем верно, так как (об этом уже упоминалось ранее) Лоренцу не удалось доказать ковариантность неоднородных уравнений Максвелла — Лоренца. В июле Пуанкаре вновь вернулся к этой проблеме. Однако в июне он уже знал правильные выражения для преобразования скоростей, что не удалось сделать Лоренцу. «Я стремился только дополнить и видоизменить [данный Лоренцем анализ]»,— отмечает Пуанкаре.

Затем он перешел к преобразованиям (6.14)—(6.16), «...которые мы будем называть преобразованиями Лоренца», и продолжил: «Все эти преобразования вместе со всеми пространственными вращениями должны образовывать группу; но для этого нужно, чтобы [17]) $\varepsilon = 1$; таким образом, мы пришли к необходимости предположить, что $\varepsilon = 1$, это и является следствием, которое Лоренц получил другим путем».

Наконец, в статье обсуждается проблема тяготения. Следуя динамическому подходу Лоренца, Пункаре на основе более общей и абстрактной аргументации пришел к выводу о том, что все силы должны подчиняться преобразованиям Лоренца одинаковым образом. Отсюда он заключил, что законы Ньютона нужно изменить и что должны существовать гравитационные волны, распространяющиеся со скоростью света! В заключение он отметил, что соответствующие поправки к закону Ньютона должны быть порядка $O(v^2/c^2)$ и точность астрономических на-

[17]) Я использую здесь обозначения из уравнений (6.14)—(6.16). Пуанкаре вместо ε писал l.

блюдений, видимо, не исключает возможности зарегистрировать эффекты такого порядка.

В июльской статье Пуанкаре подробно рассмотрел и многие другие вопросы. Первый параграф, озаглавленный «Преобразование Лоренца», содержит полное доказательство ковариантности электродинамики: «Здесь я должен отметить первое расхождение с Лоренцем» [P13]. В § 4 рассматривается непрерывная группа, «...которую мы назовем *группой Лоренца*». Пуанкаре разъясняет, почему он выбрал $\varepsilon = 1$: взяв за основу уравнения (6.14)—(6.16), рассмотрим обращение этих преобразований, т. е. замену $v \to -v$. Ясно, что

$$\varepsilon(v)\,\varepsilon(-v) = 1. \tag{6.17}$$

Более того, из поворота вокруг оси y на 180° следует, что

$$\varepsilon(v) = \varepsilon(-v) \tag{6.18}$$

и в результате

$$\varepsilon(v) = 1. \tag{6.19}$$

Из равенства ε единице следует, что

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 \text{ не изменяется.} \tag{6.20}$$

Демонстрируя групповые свойства преобразований Лоренца, Пуанкаре замечает, что «произведение» двух преобразований [уравнения (6.3)], одного для скорости v_1, другого для скорости v_2, приводит к еще одному преобразованию Лоренца, при котором скорость v задается выражением вида

$$v = (v_1 + v_2)/(1 + v_1v_2/c^2). \tag{6.21}$$

Пуанкаре, конечно, не подозревал, что кто-то другой за несколько недель до него уже отметил групповые свойства преобразований Лоренца и вывел уравнения (6.19)—(6.21) практически тем же способом.

Позднее мы вернемся к работам Лоренца 1904 г. и Пуанкаре 1905 г., в которых они предлагают свои теории электрона. Пока, как мне кажется, я достаточно полно остановился на роли Лоренца и Пуанкаре в разработке теории относительности. Мы вновь встретимся с ними после того, как обсудим две статьи Эйнштейна, посвященные этой же проблеме. Затем я попытаюсь сравнить их вклад в создание СТО.

В качестве последнего подготовительного шага к рассказу о создании Эйнштейном теории относительности упомяну то немногое, что нам известно о ходе его мыслей до 1905 г.

§ 6.4. Эйнштейн до 1905 г.

Эйнштейн начал интересоваться теорией электромагнетизма еще в Павии в 1895 г. после побега из ненавистной ему мюнхенской школы. Приводимые ниже краткие отрывочные заметки

касаются его интереса к электродинамике в десятилетие, предшествовавшее созданию СТО.

Эссе, написанное в Павии[12]). В 1895 г. Эйнштейн послал своему дяде Цезарю Коху, жившему в Бельгии, рукопись, озаглавленную «К рассмотрению состояния эфира в магнитном поле». К рукописи, которую Эйнштейн так никогда и не опубликовал, было приложено сопроводительное письмо: «[Эта работа] касается очень узкой темы и... довольно наивна и неполна, что естественно для молодого человека». В начале эссе он призывает читателя к снисходительности: «У меня совершенно не было материалов, позволявших глубже проникнуть в суть проблемы, что может создать впечатление о поверхностности подхода».

Основной вопрос, который поставил Эйнштейн в своем эссе, сводится к следующему: как влияет на окружающий эфир магнитное поле, возникающее при появлении электрического тока? Как, в свою очередь, это магнитное поле влияет на силу тока? Очевидно, что в то время Эйнштейн верил в существование эфира. Он рассматривал его как упругую среду и, в частности, интересовался тем, как «...три составляющих упругости влияют на скорость распространения эфирной волны», возникающей при появлении тока. Он пришел к следующему выводу: «Прежде всего, следует [экспериментально] показать, что имеется пассивное сопротивление генерированию электрическим током магнитного поля; это сопротивление пропорционально длине проводника и не зависит от природы его вещества и площади поперечного сечения». Таким образом, молодой Эйнштейн самостоятельно открыл качественные характеристики самоиндукции (этот термин он не использовал). Ясно, что тогда он еще не был знаком с выполненными ранее по данной теме работами. В этой рукописи он упоминает о «великолепных опытах Герца». Мне неизвестно, как он узнал о работах Герца. Как бы то ни было, очевидно, что в то время он уже знал об электромагнитной природе света, но еще не был знаком с работами Максвелла.

Вопрос, поставленный в Аарау. В последней автобиографической статье — «Автобиографических набросках» [E12] Эйнштейн писал: «В том же году [между октябрем 1895 г. и осенью 1896 г.] в Аарау у меня возник вопрос: если бы можно было погнаться за световой волной со скоростью света, то имели бы мы перед собой не зависящее от времени волновое поле? Такое все-таки кажется невозможным! Это был первый детский мысленный эксперимент, который относился к специальной теории относительности». И тут же добавил: «Открытие не является делом логического мышления, даже если конечный продукт связан с логической формой». Кроме того, в более обстоятельной

[12]) В 1950 г. Эйнштейн датировал эту рукопись 1894—1895 гг. Она была послана Ц. Коху в 1895 г., так как в своем письме Эйнштейн пишет о намерении поступать в Цюрихский политехникум и добавляет: «В следующем письме я расскажу, что из этого вышло». Эссе и письмо приведены в [M18].

автобиографии 1949 г. Эйнштейн отметил: «Такой принцип [т. е. СТО] я получил после 10 лет размышлений из парадокса, на который натолкнулся уже в 16 лет» [E6].

Студент политехникума. Так как Рудольф Кайзер, зять и биограф Эйнштейна, не был физиком, логично предположить, что приводимые ниже строки из книги Кайзера написаны самим Эйнштейном: «Он уже на втором году обучения в институте [1897—1898] натолкнулся на проблему света, эфира и движения Земли. Эйнштейн не переставал думать о ней и хотел построить установку, которая позволяла бы точно измерить характеристики движения Земли относительно эфира. О том, что такие же намерения были у других ученых, он в то время не знал. Тогда он еще не был знаком с крупным трудом великого голландского физика Хендрика Лоренца и со ставшим впоследствии знаменитым опытом Майкельсона. Он хотел двигаться вперед эмпирическим путем и считал, что задуманная им установка поможет решить проблему, далеко идущие последствия которой он предвидел уже тогда. Но создать такую установку ему не удалось. Преподаватели были настроены весьма скептически, а сам он не обладал необходимой предприимчивостью. Поэтому Альберт отложил осуществление своего замысла, но не отказался от него. Он по-прежнему надеялся на то, что в будущем сможет решать проблемы физики путем наблюдений и экспериментов» [E2].

Что касается теории электромагнетизма, то лекции по этому предмету не были предусмотрены в программе политехникума. Как отмечалось в гл. 3, Эйнштейн познакомился с этой теорией по учебнику Фёппля.

Письмо, написанное в Винтертуре. Из письма, написанного Эйнштейном Гроссману из Винтертура в 1901 г., видно, что опыт по обнаружению эфирного ветра по-прежнему занимал мысли Эйнштейна: «Мне пришел в голову новый, значительно более простой метод определения движения вещества относительно эфира. О, если бы безжалостная судьба позволила мне выполнить этот замысел!» [E13]. Так как Эйнштейн в письме сразу перешел к делу, создается впечатление, что Гроссман уже что-то знал о другом методе, предложенном Эйнштейном раньше, когда они вместе учились в политехникуме.

Из этого письма также видно, что Эйнштейн верил в существование эфира до 1901 г.

Лекция, прочитанная в Берне. Вечером 5 декабря 1903 г. Альберт Эйнштейн, технический эксперт третьего класса с временным контрактом, выступил в конференц-зале бернского отеля «Шторхен» перед членами Общества любителей природы. Он был избран членом этого общества 2 мая 1903 г. Тема его декабрьской лекции звучала так: «Теория электромагнитных волн» [F6]. Было бы чрезвычайно интересно узнать, о чем говорил Эйнштейн в тот вечер. Однако, насколько я знаю, записи этой лекции не существует.

Выступление в Киото. Наконец, процитирую еще один отрывок из лекции, с которой Эйнштейн выступил в Киото в 1922 г. Но прежде хотелось бы отметить, что мне неизвестно, какой период времени имеет в виду Эйнштейн, говоря «...я тогда думал» и «...в те дни».

«Я тогда думал, что нужно экспериментально показать каким-либо образом наличие потока эфира относительно Земли, т. е. движение Земли [относительно эфира]. В те дни, когда я задумался над этой проблемой, я был полностью уверен в существовании эфира и в движении Земли относительно него. Тогда я планировал проверить это, измерив разницу в теплоте, выделяющейся на термопаре при облучении ее светом одного и того же источника, но идущим сначала в одном направлении, а затем отражающимся в противоположном направлении от соответствующим образом расположенных зеркал; я при этом предполагал, что пучки света, распространяющиеся в противоположных направлениях, должны иметь разную энергию. Эта идея аналогична идее опыта Майкельсона, но пока я не провел такого опыта и не получил определенного результата» [O1].

Резюме. В той же лекции Эйнштейн отметил: «Трудно сказать, как я пришел к теории относительности, поскольку многие скрытые факторы влияют на человеческое мышление и, кроме того, воздействие их различно» [O1]. Но даже с учетом этого заявления мне представляется, что я даю в общем верное резюме работ и идей Эйнштейна в области электродинамики до 1905 г.

Первый период творческой деятельности Эйнштейна датируется годами его пребывания в средней школе, когда он самостоятельно открыл самоиндукцию; естественно, открытие этого явления не принадлежит Эйнштейну. Минимум дважды у него возникали идеи по новым экспериментальным методам измерения эфирного ветра. Он собирался сам выполнить эти опыты, но не смог либо из-за несогласия преподавателей [R2], либо из-за отсутствия свободного времени [E13]. Он верил в существование эфира по меньшей мере до 1901 г. [E13]. В период с 1895 по 1896 г. его осенила мысль о том, что свет нельзя остановить [E12]. Он знал об опыте Майкельсона — Морли, но этот опыт не сыграл такой важной роли в создании СТО, как эффекты первого порядка — аберрация света и увлечение эфира [S6, O1]. Он знал о работе Лоренца 1895 г., в которой подробно обсуждался опыт Майкельсона — Морли. Он не был знаком с преобразованиями Лоренца. Он не читал никаких работ, касавшихся технических деталей.

Однако почти наверняка еще до 1905 г. Эйнштейн знал о парижском выступлении Пуанкаре 1900 г. и читал замечание Пуанкаре 1898 г. об отсутствии интуитивного понимания равенства двух интервалов времени. До 1905 г. Эйнштейн вместе с друзьями по «Академии Олимпия» читал некоторые из работ Пуанкаре общего характера: «В Берне мы вместе с К. Габихтом

и Соловином регулярно устраивали вечера, где читали и обсуждали произведения философов, главным образом Юма... Чтение Юма, а также Пуанкаре и Маха оказало определенное влияние на мое развитие» [Е14].

Четыре сборника трудов Пуанкаре — «Наука и гипотеза», «Ценность науки», «Наука и метод» и «Последние мысли» — впервые вышли соответственно в 1902, 1905, 1908 и 1913 гг. Все три программные статьи Пуанкаре, упоминавшиеся в § 6.2, содержатся в том или ином из этих сборников. Его статья 1898 г., в которой ставится под сомнение наивное толкование понятия одновременности, а также выступление в Сент-Луисе в 1904 г. приведены в книге «Ценность науки»; парижское выступление 1900 г.— в сборнике «Наука и гипотеза». Именно эту последнюю книгу, единственную из четырех, вышедшую до 1905 г., Эйнштейн с друзьями читали в Берне. Посему я склонен полагать, что до публикации своей первой статьи по СТО Эйнштейн был знаком с парижским выступлением Пуанкаре, где тот указал, что отсутствие свидетельств движения относительно эфира должно, вообще говоря, проявляться для членов любого порядка по v/c и что «...уничтожение членов [зависящих от скорости] будет точным и абсолютным». Более того, в книге «Наука и гипотеза» есть глава, посвященная классической механике, где Пуанкаре пишет: «Не существует абсолютного времени; утверждение, что два промежутка времени равны, само по себе не имеет смысла, и можно принять его только *условно*. Мы не способны к непосредственному восприятию не только равенства двух промежутков времени, но даже простого факта одновременности двух событий, происходящих в разных местах; я разъяснил это в статье, озаглавленной „Измерение времени“». Хочу подчеркнуть, что Эйнштейн с друзьями не просто листали работы Пуанкаре. Соловин оставил нам подробный список книг, изучавшихся членами «Академии». Из всего списка он выделяет одну-единственную книгу — «Наука и гипотеза», причем говорит о ней так: «[Эта] книга произвела на нас столь сильное впечатление, что в течение нескольких недель мы не могли прийти в себя» [Е15]!

Я продолжу разговор об Эйнштейне и Пуанкаре в гл. 8, а в следующей главе расскажу о том, как Эйнштейн создал специальную теорию относительности.

Глава 7. НОВАЯ КИНЕМАТИКА

§ 7.1. Июнь 1905 г.: формулировка СТО, вывод преобразований Лоренца

Эстетические корни теории относительности. Без среды-переносчика свет нельзя увидеть, точно так же, как звук нельзя услышать. Такого, в общем, разумного подхода придерживались

физики в XIX в. Но по мере все более глубокого понимания природы света свойства среды-переносчика (эфира) приобретали все более ограниченный характер. Наиболее удачным представлялся абсолютно неподвижный эфир, через который мчится наша планета с населяющими ее людьми. Когда выяснилось, что световые волны поперечны, эфир был объявлен квазиупругим.

СТО лишила эфир его основного механического свойства — абсолютного покоя — и тем самым продемонстрировала, что в нем нет необходимости. Как писал Эйнштейн во вводной части статьи, представленной в июне 1905 г. (далее она будет называться июньской статьей), «...введение „светоносного эфира" при этом окажется излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится „абсолютно покоящееся пространство", наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости» [E1]. Появление СТО привело к отказу от механистической картины как вспомогательного средства толкования электромагнетизма. При этом навсегда отбрасывается одна-единственная выделенная система отсчета, находящаяся в абсолютном покое. Ее место занимает бесчисленное множество выделенных систем — инерциальных. По определению, любые две из них находятся в состоянии равномерного и прямолинейного движения относительно друг друга. Такое выделение особого вида относительного движения — равномерного и прямолинейного — делает этот вариант теории относительности специальным.

Весной 1905 г., еще до завершения работы над СТО Эйнштейн писал своему другу Конраду Габихту: «Четвертая работа [т. е. [E1], четвертая статья, опубликованная Эйнштейном в 1905 г.] еще не совсем закончена: в ней речь идет об электродинамике движущихся тел, при этом несколько изменяются традиционные представления о пространстве и времени. Тебя, несомненно, заинтересует чисто кинематическая часть» [E2]. Неудивительно, что Эйнштейн обращает внимание своего друга на кинематику. Целиком июньская статья состоит из введения, пяти разделов по кинематике и пяти разделов по электродинамике; в ней совсем нет ссылок, но есть одна благодарность. В кинематической части содержатся постулаты СТО.

Как упоминалось в гл. 6, СТО появилась на свет после десяти лет размышления, но окончательно основополагающие кинематические представления, которые легли в основу СТО, сформировались за пять-шесть недель до окончания работы над обсуждаемой статьей. Об этом известно из выступления Эйнштейна в Киото в декабре 1922 г., где он также рассказал о годичном периоде бесплодных размышлений [O1]:

> «С учетом результата опыта Физо я попытался решить всю задачу, исходя из предположения о том, что уравнения

Лоренца для электрона должны быть справедливы и для системы отсчета, связанной с движущимися в вакууме телами. В то время я был уверен в справедливости уравнений электродинамики Максвелла — Лоренца. Более того, из них вытекали соотношения так называемой инвариантности скорости света, вследствие чего эти уравнения должны быть справедливы и для движущихся систем отсчета. Однако инвариантность скорости света противоречила известному из механики правилу сложения скоростей.

Пытаясь разрешить это противоречие, я столкнулся с огромными трудностями. Я потратил впустую почти год, пытаясь несколько видоизменить идеи Лоренца, и пришел к выводу, что загадка совсем не проста.

Неожиданно мне помог мой друг из Берна. В один поистине прекрасный день я пришел к нему и сказал: „Я недавно натолкнулся на трудноразрешимую проблему и обращаюсь к тебе за помощью". Мы с ним рассматривали ее со всех сторон, пока я не понял, в чем дело. На следующий день я вновь пришел к нему и, не здороваясь, сказал: „Спасибо! Я, наконец, решил эту задачу". Решение заключалось в пересмотре понятия времени, т. е. оказалось, что время не может определяться абсолютно — имеется неразрывная связь между временем и скоростью распространения сигналов. На основе такого представления можно преодолеть все огромные трудности. Через пять недель с того момента, как я это осознал, специальная теория относительности была готова».

Другом, жившим в Берне, был Бессо, с которым Эйнштейн поддерживал тесные отношения еще со студенческих времен, его коллега по патентному бюро с 1904 г. Итак, из выступления в Киото становится ясно, почему «...друг и коллега М. Бессо явился помощником», как писал Эйнштейн в июньской статье. Говоря о пяти неделях, Эйнштейн имел в виду, что он смог полностью сконцентрировать свое внимание на теории относительности и послать эту работу в журнал «Annalen der Physik» 30 июня, сбросив с себя груз предыдущих крупных работ по статистической физике — статьи о световых квантах, диссертации и статьи о броуновском движении — законченных соответственно 17 марта, 30 апреля и примерно 10 мая.

Как мы увидим позднее, в 1905 г. вера Эйнштейна в «справедливость уравнений электродинамики Максвелла — Лоренца» отнюдь не была безграничной. Однако ее было достаточно для того, чтобы увидеть противоречие между постоянством скорости света (в вакууме) и принципом относительности классической механики. Из этого давно известного принципа следует, что все законы механики должны быть одинаковы в любых двух системах отсчета (x, y, z, t) и (x', y', z', t'), связанных соотно-

шениями [1])

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \tag{7.1}$$

С 1909 г. они стали называться преобразованиями Галилея [2]). (Вспомним, что в 1905 г. ничто не указывало на несправедливость галилеевой инвариантности в чисто механических процессах.) Противоречие возникает при попытке возвести галилееву инвариантность в универсальный принцип. Находящийся в абсолютном покое эфир никак не укладывается в такую картину. Поэтому некоторые физики считали, что следует пересмотреть сами основы электродинамики [3]). Эйнштейн поступил по-другому: «Не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя...» [E1]. В июньской статье он привел два конкретных аргумента в пользу такой точки зрения: во-первых, отсутствие экспериментального подтверждения существования эфирного ветра и, во-вторых, наличие «асимметрии, не свойственной самим явлениям». В качестве примера такой асимметрии он рассматривает систему, состоящую из магнита и проводника. При движении магнита относительно покоящегося проводника возникает электрическое поле, вызывающее появление тока в проводнике. При движении же проводника относительно неподвижного магнита появляется электродвижущая сила (пропорциональная $\mathbf{v} \times \mathbf{H}$), также вызывающая появление тока. Образно говоря, Эйнштейну не нравились нелогичный отрыв электричества от магнетизма и упомянутая выше асимметрия двух систем.

В гл. 6 я упоминал о том, что Эйнштейн отверг предлагавшиеся в XIX в. объяснения эффектов первого порядка с помощью эфирного ветра как искусственные и неубедительные; в то же время парадоксы второго порядка в опыте Майкельсона — Морли играли для него второстепенную роль. Если к этому добавить еще замечание о том, что «...электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая не свойственна, по-видимому, самим явлениям», то станет понятна причина, побудившая Эйнштейна написать июньскую статью: Эйнштейн пришел к СТО в основном из эстетических соображений, из стремления к простоте. Эта всепоглощающая страсть владела им на протяжении всей жизни. Она позволила ему добиться величайшего успеха — создания общей теории относительности, она же послужила причиной его крупнейшей неудачи — провала попыток построения единой теории поля.

Два постулата. Новая теория полностью основана на двух постулатах [4]) [E1]:

---

[1]) Как и в предыдущей главе, для простоты будем рассматривать лишь движение в направлении оси x.

[2]) Этот термин был предложен Филиппом Франком [F1].

[3]) Более подробно об этом см. в статье Паули [P1].

[4]) Я не следую буквально Эйнштейну. Термин *инерциальная система отсчета* стал широко применяться несколько позднее, равно как и термин

Из первого постулата вытекает, что $t_1 = t_2$, но $t_1 \neq t_1'$: «Итак, мы видим, что не следует придавать *абсолютного* значения понятию одновременности».

Два постулата СТО имеют физическое содержание *лишь в том случае*, если они дополняются экспериментальными указаниями по измерению положения и времени (и, следовательно, скорости). Эти постулаты вместе с данными указаниями полностью определяют специальную теорию относительности Эйнштейна.

От постулатов к преобразованиям Лоренца. Продолжим рассмотрение примера с двумя стержнями. В физике недостаточно лишь указать на наличие неравенства $t_1 \neq t_1'$, нужно установить соотношение между этими двумя интервалами. Эйнштейн получил такое соотношение из своих постулатов, выведя из них преобразования Лоренца. В основном его вывод сводится к следующему. Рассмотрим две инерциальные системы отсчета (x, y, z, t) и (x', y', z', t'), причем вторая движется относительно первой в направлении x со скоростью v. В момент $t = t' = 0$ системы совмещены. В тот же момент из их общего начала координат испускается сферическая световая волна. Спустя t секунд фронт этой волны описывается уравнением сферической поверхности

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2. \tag{7.2}$$

Из совместимости двух постулатов следует, что та же волна должна описываться уравнением

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 = c^2(t')^2. \tag{7.3}$$

Условие однородности пространства и времени означает, что связь между двумя системами отсчета, описываемыми приведенными выше уравнениями, должна быть линейной. В результате простых преобразований получаем

$$x' = \varepsilon\gamma(x - vt), \quad y' = \varepsilon y, \quad z' = \varepsilon z, \quad t' = \varepsilon\gamma(t - vx/c^2), \tag{7.4}$$

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}, \tag{7.5}$$

где ε — произвольный масштабный множитель, зависящий только от скорости v. Так как замена этого преобразования обратным должна приводить к тождеству, имеем

$$\varepsilon(v)\varepsilon(-v) = 1. \tag{7.6}$$

Из требований симметрии следует, что вид преобразований для y и z не должен изменяться при замене $v \to -v$; следовательно,

$$\varepsilon(v) = \varepsilon(-v). \tag{7.7}$$

Итак, $\varepsilon(v) = 1$, так как $\varepsilon(0) = 1$, откуда

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma(t - vx/c^2). \tag{7.8}$$

В гл. 6 мы встречались с этими уравнениями при обсуждении

работ Лоренца и Пуанкаре, но такой вывод преобразований Лоренца из постулатов впервые был приведен в статье Эйнштейна [8]).

Эйнштейн также указал, что преобразования типа уравнений (7.8) образуют группу, «...как это и должно быть»[9]) — два последовательных преобразования для скоростей v_1, v_2, имеющих одинаковое направление, приводят к новому преобразованию вида (7.8) для скорости v:

$$v = (v_1 + v_2)/(1 + v_1 v_2/c^2). \qquad (7.9)$$

Спустя 20 лет в Лейдене Эйнштейн узнал о группе Лоренца нечто такое, что поразило даже его. В октябре 1925 г. Джордж Юджин Уленбек и Самьюэл Гаудсмит открыли спин электрона [U1] и тем самым объяснили наличие дублетов в спектре щелочных металлов, но вскоре оказалось, что расчеты давали неверное значение для расщепления дублета. Тогда Левелин Томас предложил ввести недостававший множитель, равный 2, известный сейчас как коэффициент Томаса [T1]. Уленбек рассказывал мне, что когда вышла работа Томаса, он не понял в ней ни слова. «Помню, что когда я впервые услышал об этом, то не поверил, так как казалось невероятным, чтобы релятивистские эффекты давали множитель, равный 2, а не что-то порядка v/c... Даже специалисты по теории относительности (в том числе и Эйнштейн!) были весьма удивлены» [U2]. В основе объяснения прецессии Томаса лежит тот факт, что преобразование Лоренца для скорости $\mathbf{v}_1$, после которого выполняется второе преобразование для скорости $\mathbf{v}_2$, имеющей другое направление, не приводит к той же инерциальной системе отсчета, что одно преобразование Лоренца для скоростей $\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$ [K1]. (Паули потребовалось несколько недель для того, чтобы понять, что имел в виду Томас [10]).)

Приложения. В июньской статье Эйнштейн применил свои постулаты так, как сейчас это излагается в учебниках, поэтому ниже выкладки не приводятся. (Вывод Эйнштейна см. в [S1].)

А. Как из постулатов получаются преобразования Лоренца, было показано выше.

Б. Из преобразований Лоренца следуют сокращение Фицджеральда — Лоренца и растяжение времени:

$$\gamma l = l_0, \quad t = \gamma t_0, \qquad (7.10)$$

где l_0 и t_0 — соответственно длина и интервал времени в покоящейся системе отсчета. Кинематическое происхождение этих соотношений было понято не сразу, и в 1911 г. Эйнштейну по-прежнему приходилось давать объяснения: «Вопрос о том, реально лоренцево сокращение или нет, не имеет смысла. Сокра-

---

[8]) Интересные соображения о роли постулатов и наблюдений в СТО см. в [R1].

[9]) Он не расшифровал это таинственное замечание.

[10]) См. переписку между Паули, Бором и Крамерсом за период с 26 февраля по 12 марта 1926 г. [P3].

щение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом» [E4].

В. Формула сложения скоростей приводилась выше.

Г. Релятивистское выражение для аберрации света, идущего от находящегося в зените источника, имеет вид

$$\operatorname{tg}\alpha = \gamma v/c. \tag{7.11}$$

Д. Закон преобразования частоты света записывается так:

$$\nu' = \gamma\nu(1 - v\cos\varphi/c), \tag{7.12}$$

где φ — угол между осью x и направлением распространения монохроматического светового луча с частотой ν. Таким образом, Эйнштейн открыл поперечный эффект Доплера: ν' отличается от ν даже в том случае, когда источник света перемещается перпендикулярно к направлению наблюдения. В 1907 г. он напечатал краткое сообщение об экспериментальном обнаружении поперечного эффекта [E5].

Е. В июньской статье *нет* вывода формулы Френеля [11])

$$c' = c/n + v(1 - 1/n^2), \tag{7.13}$$

являющейся прямым следствием уравнения (7.9): полагаем $v_1 = c/n$, $v_2 = v$ и проводим разложение в ряд до членов первого порядка по v_1v_2/c^2. Я считаю отсутствие этого вывода в июньской статье фактом гораздо более примечательным, чем отсутствие упоминания опыта Майкельсона — Морли. Вывод совсем не труден, а опыт Физо был очень важен для хода мыслей Эйнштейна, и получение этой формулы без привлечения гипотезы эфира принесло бы удовлетворение даже Эйнштейну, который вовсе не был склонен упиваться своими достижениями. Честь первого вывода принадлежит Максу Лауэ (1907), указавшему, что «...в соответствии с принципом относительности, свет *полностью* увлекается телом [т. е. движущейся жидкостью], но именно поэтому его скорость по отношению к наблюдателю, не участвующему в движении тела, не равна векторной сумме его скорости по отношению к телу и [скорости] тела по отношению к наблюдателю» [L1]. Как указывалось в гл. 6, для небольших значений v/c уравнение (7.13) может быть получено из динамических соображений без явного использования теории относительности (см., например, [P2, гл. 11]). Приведенный выше кинематический вывод не означает, что прежний результат неверен, он просто заменяет его. Для получения искомого результата достаточно использовать лоренц-инвариантность.

---

[11]) Смысл символов объясняется в § 6.1. Замечания Эйнштейна по поводу диспергирующей среды см. в [E5a].

Ж. Эйнштейн мимоходом отметил, что если двое часов C_1 и C_2 синхронизированы в одном и том же исходном положении, а затем C_2 покидают систему отсчета A и по замкнутой траектории снова возвращаются в A, то часы C_2 отстанут по сравнению с часами C_1. Он назвал этот результат теоремой и не несет ответственности за укоренившееся впоследствии неправильное название «парадокс часов». Позднее Эйнштейн показал [E6], что для объяснения этого явления (с тех пор часто наблюдавшегося в лабораториях) логики СТО недостаточно, так как здесь появляется неинерциальная система отсчета.

3. В июньской статье показана ковариантность уравнений электродинамики. Используя устрашающую, но довольно широко распространенную в то время систему обозначений, при которой каждый компонент электрического и магнитного полей имел собственное обозначение[12]), Эйнштейн доказал лоренц-ковариантность уравнений Максвелла — Лоренца сначала для поля без источников, а затем и для поля с источниками. Он также рассмотрел уравнения движения электрически заряженной частицы с зарядом e и массой m, находящейся во внешнем электромагнитном поле. В системе отсчета $(\mathbf{x}, t)$, в которой частица в данный момент находится в покое, эти уравнения имеют вид

$$m\, d^2\mathbf{x}/dt^2 = e\mathbf{E}. \tag{7.14}$$

Применив преобразования (7.8), он обнаружил, что для системы отсчета, движущейся в направлении x со скоростью v, получаются следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned} &m\gamma^3 d^2x'/d(t')^2 = K'_{x'}, \\ &m\gamma d^2y'/d(t')^2 = K'_{y'}, \quad m\gamma d^2z'/d(t')^2 = K'_{z'}, \end{aligned}\right\} \tag{7.15}$$

$$\mathbf{K}' = e(\mathbf{E}' + \mathbf{v}\times\mathbf{H}'/c). \tag{7.16}$$

Таким образом, Эйнштейн получил то, что он назвал «новым способом выражения» силы Лоренца. В то время как в 1895 г. Лоренц [L2] ввел уравнение (7.16) в качестве нового предположения [см. (6.13)], Эйнштейн получил его кинематически как чисто электрическую силу, которая действует на заряженную частицу, в данный момент находящуюся в покое. Он также дал выражение для кинетической энергии частицы W в случае, когда ускорение мало и, следовательно, нет потери энергии в виде излучения. Тогда

$$W = \int K'_{x'}\, dx' = m\int_0^v \gamma^3 v\, dv = mc^2(\gamma - 1). \tag{7.17}$$

Это соотношение привело Эйнштейна к следующему выводу: «При $v = c$ значение W становится, таким образом, бесконечно

[12]) Герц, Планк и Пуанкаре поступали так же. Лоренц использовал трехвекторные обозначения.

большим... Скорости, превышающие скорость света, существовать не могут». (В 1907 г. Эйнштейн вел об этом переписку с В. Вином.)

Этот вывод, видимо, не совсем верен. Точно он должен звучать так: если частица движется со скоростью, меньшей (большей) c в одной инерциальной системе отсчета, то тогда она движется со скоростью, меньшей (большей) c всех инерциальных системах отсчета. (Относительная скорость инерциальных систем отсчета по определению меньше или равна c.) Таким образом, скорость света является барьером в двух смыслах. В соответствии с выражением (7.9) скорость c — верхний (нижний) предел для частицы, движущейся со субсветовой (сверхсветовой) скоростью. Некоторые физики высказывали предположения о фантастических свойствах «тахионов» (это наименование для гипотетических частиц, движущихся со сверхсветовой скоростью, было предложено Джеральдом Фейнбергом [F2] [13]). Тахионы могут появляться в нашем уютном субсветовом мире лишь в том случае, когда они образуются парами, поэтому физика тахионов относится к квантовой теории поля. Квантовая теория свободных тахионов уже получила некоторое развитие [F2], но теоретическое описание взаимодействий с участием тахионов пока еще остается открытой проблемой.

Теория относительности и квантовая теория. В июньской статье приводится также закон преобразования энергии E светового комплекса:

$$E' = \gamma E(1 - v\cos\varphi/c), \tag{7.18}$$

где φ — то же, что и в уравнении (7.12). По поводу сходства уравнений (7.12) и (7.18) Эйнштейн писал: «Замечательно то, что и энергия и частота светового комплекса с изменением состояния движения наблюдателя меняются по одному и тому же закону».

Три месяца спустя Эйнштейн закончил работу, в которой содержалось соотношение

$$E = h\nu, \tag{7.19}$$

связывающее энергию и частоту световых квантов [E7]. Интересно, что Эйнштейн упоминал о сходстве преобразований энергии и частоты, не ссылаясь на полученное им совсем недавно квантовое соотношение, связывающее энергию света с частотой. Но как ни примечательно такое молчание, ему есть объяснение. Как я уже говорил, Эйнштейн, несомненно, верил в справедливость электродинамики Максвелла — Лоренца, но отнюдь не безоговорочно. В своей статье о световых квантах он писал: «Волновая теория света, оперирующая с непрерывными функциями точки, прекрасно оправдывается при описании чисто оптических явлений... [Однако] может оказаться, что [она] ... приведет к противоречию с опытом, когда ее будут применять к явлениям возникновения и превращения света» [E7]. Эйнштейн считал теорию *свободного* электромагнитного поля Максвелла — Лоренца настолько совершенной, что она «...едва ли будет за-

[13]) См., например, [B2, F2], где содержатся ссылки на работы, вышедшие ранее.

менена какой-либо иной теорией», но испытывал сомнения по поводу ее применимости к взаимодействию с веществом. Кроме того, он справедливо считал свою квантовую гипотезу 1905 г. не новой теорией, а новым феноменологическим описанием, в отличие от теории относительности, которую он по праву рассматривал как настоящую теорию с четко определенными исходными посылками. Поэтому неудивительно, что Эйнштейн вывел уравнения (7.12) и (7.18) порознь, не прибегая к уравнению (7.19).

Не только в 1905 г., но и на протяжении всей жизни Эйнштейн считал квантовую теорию прологом к настоящей теории, а теорию относительности — столбовой дорогой к построению такой теории. К этой теме мы вернемся в гл. 26.

«Я мог бы сказать это проще...». Осенью 1943 г. Эйнштейна посетил Джулиан Бойд, сотрудник библиотеки Принстонского университета. Бойд попросил Эйнштейна передать в дар Комитету писателей по содействию в распространении облигаций военных займов рукопись июньской статьи. Эйнштейн ответил, что после публикации статьи он выбросил оригинал рукописи, но добавил, что готов от руки переписать эту статью. Предложение было с благодарностью принято. Эйнштейн закончил переписку статьи 21 ноября 1943 г. Под эгидой этого комитета рукопись была продана в Канзас-сити 3 февраля 1944 г. с аукциона, организованного при участии женского городского клуба и Канзасского отделения военно-финансового комитета. Рукопись была приобретена за 6,5 млн. дол. страховой компанией Канзас-сити. Тогда же был продан и оригинал незаконченной рукописи Эйнштейна и Валентина Баргмана «Бивекторное поле»; за нее было заплачено 5 млн. дол.[14]). Вскоре обе эти рукописи были переданы в Библиотеку конгресса [B3].

Элен Дюкас рассказала мне, как была написана копия июньской статьи. Она сидела рядом с Эйнштейном и диктовала ему текст. Вдруг Эйнштейн отложил ручку, повернулся к Элен и спросил, действительно ли написано именно так, как она продиктовала. Получив утвердительный ответ, Эйнштейн заметил: «Я мог бы сказать это проще».

§ 7.2. Сентябрь 1905 г. О выражении $E=mc^2$

«Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии»,— заключил в сентябре 1905 г. А. Эйнштейн, технический эксперт третьего класса Федерального патентного бюро в Берне [E9]. «Закон сохранения массы является частным случаем закона сохранения энергии»,— написал в мае 1906 г. А. Эйнштейн, технический эксперт второго класса [E10]. «Масса [m] эквивалентна в смысле инерции количеству энергии mc^2... Этот результат имеет чрезвычайно важное теоретическое значение: ...инертная масса и энергия физической системы выступают как однородные

[14]) Эта работа была опубликована на английском языке в 1944 г. [E8].

величины»,— отметил он в 1907 г. [E11]. О частных случаях эквивалентности массы и энергии было известно на протяжении примерно 25 лет [15]). Новизна работы 1905 г. заключалась в обобщении связи между ними.

Эйнштейн вывел соотношение

$$E = mc^2 \tag{7.20}$$

в 1905 г. следующим образом [16]). Рассмотрим тело, имеющее в состоянии покоя в заданной инерциальной системе отсчета энергию E_i. Предположим, что затем тело начало излучать плоские световые волны с энергией $L/2$ в направлении, составляющем угол φ с осью x, и такое же количество световой энергии в противоположном направлении. После испускания излучения тело имеет энергию E_f такую, что $\Delta E = E_i - E_f = L$. Рассмотрим это же явление с точки зрения наблюдателя, связанного с инерциальной системой отсчета, которая движется в направлении x со скоростью v. Из уравнения (7.18) следует, что $\Delta E' = E'_i - E'_f = \gamma L$ вне зависимости от φ. Таким образом,

$$\Delta E' - \Delta E = L(\gamma - 1), \tag{7.21}$$

или, до членов второго порядка,

$$\Delta E' - \Delta E = (1/2)(L/c^2)v^2. \tag{7.22}$$

Теперь, указывает Эйнштейн, отметим, что уравнение (7.21) для разности энергий идентично по структуре уравнению (7.17) для разности кинетических энергий частицы, поэтому «...если тело отдает энергию в виде излучения, то его масса уменьшается на $[L/c^2]$. При этом, очевидно, несущественно, что энергия, взятая у тела, прямо переходит в лучистую энергию...».

Эта небольшая статья, написанная в сентябре 1905 г., заканчивается замечанием о том, что вещества, «...энергия которых меняется в большей степени (например, соли радия)», могут, видимо, использоваться для проверки данного предположения. Но полной уверенности у Эйнштейна не было. Осенью 1905 г. он написал Габихту: «Такой ход мыслей захватывает и увлекает, но я не знаю, не смеется ли надо мной господь бог, и не сыграл ли он со мной злую шутку» [E14]. В обзорной статье 1907 г. он заключил, что в экспериментах с радием «...необходимая точность измерений недостижима» [E15]. В другом обзоре, написанном в 1910 г., Эйнштейн отметил, что «...в настоящее время нет

---

[15]) Об электромагнитной массе см. § 7.5. Еще до сентября 1905 г. Фриц Газенорль пришел к выводу, что кинетическая энергия полости возрастает при наличии в ней излучения таким образом, что это как бы увеличивает массу системы [H1].

[16]) Позднее Эйнштейн дал еще два вывода. В 1934 г. в Питсбурге он получил уравнение (7.20) из сохранения энергии и импульса для точечных частиц в инерциальных системах отсчета [E12]. В 1946 г. он привел элементарный вывод, при котором предполагаются заданными уравнения аберрации света и радиационного давления [E13].

никакой надежды» на опытную проверку эквивалентности массы и энергии [E16].

Во всех случаях Эйнштейн имел в виду уменьшение массы в результате радиоактивных превращений. Первым на то, что выражение для массы и энергии имеет отношение к энергии связи, указал Планк. В 1907 г. он рассчитал массу, эквивалентную энергии молекулярной связи для одного моля воды [P4]. Эта величина была, конечно, слишком мала (примерно 10^{-8} г), чтобы быть обнаруженной экспериментально, но ее хотя бы можно рассчитать. Спустя четверть века такую же оценку выполнили для энергии ядерной связи. До 1911 г., когда была предложена первая ядерная модель строения атома, эта проблема вообще не возникала. Два года спустя Поль Ланжевен высказал такую мысль: «Мне кажется, что инертная масса, связанная с внутренней энергией ядра, проявляется в виде некоторых отклонений от закона Праута» [L3]. В том же году Дж. Дж. Томсону впервые удалось разделить изотопы. Выдвигая свою интересную идею, Ланжевен не учел влияния смеси изотопов и потому переоценил величину эффектов ядерной связи. Положение запутывало еще и то, что ядро считалось состоящим из протонов и электронов; правильной модели никто еще не предложил. Тем не менее, Паули (уже в 1921 г.) справедливо предполагал, что «...возможно, закон инерции для энергии удастся проверить *некогда в будущем* (курсив мой.— *А. П.*) путем наблюдения за стабильностью ядер» [P1, разд. 41]. Как говорилось в 1930 г. в «библии» ядерной физики того времени, если учесть энергию связи, то получится, что масса свободного протона на 6,7 МэВ больше массы протона, находящегося в ядре гелия [R2]. Чего еще можно требовать от протон-электронной модели строения ядра?

Зависимость между энергией ядерной связи и энергией $E = mc^2$ стала окончательно ясна в 30-е годы. В 1937 г. удалось рассчитать скорость света на основе ядерных реакций, для которых были известны массы исходных и конечных продуктов, а также высвобождаемая в ходе реакции энергия. Полученное для скорости света значение с погрешностью до 0,5 % совпало с ранее известным значением [B4]. Как знать, может быть, в 1939 г., посылая знаменитое письмо президенту Рузвельту, Эйнштейн вспомнил свои собственные слова, сказанные в 1907 г.: «Не исключено, что будут открыты радиоактивные процессы, в которых в энергию радиоактивных излучений превращается значительно бо́льшая часть массы исходного атома, чем в случае радия» [E15].

§ 7.3. Первые отклики

В биографическом очерке Майи Эйнштейн четко описывается состояние ее брата вскоре после принятия к публикации журналом «Annalen der Physik» его июньской статьи. «Молодой ученый считал, что публикация в уважаемом и широко известном

журнале немедленно привлечет к себе внимание. Он ожидал значительного противодействия и суровой критики, но его постигло разочарование. Статья была встречена ледяным молчанием. В следующих номерах журнала она не упоминалась вовсе. Ученые решили занять выжидательную позицию. Спустя некоторое время после выхода статьи в свет Альберт Эйнштейн получил письмо из Берлина. Автором его был известный профессор Планк, просивший разъяснить некоторые не совсем ясные для него вопросы. Это был первый признак того, что статью хоть кто-то заметил. Радость молодого ученого была особенно велика потому, что признание его работы пришло со стороны одного из величайших физиков» [M2]. Майя упоминает также, что спустя некоторое время стали приходить письма, адресованные «профессору Бернского университета А. Эйнштейну».

То, что теория относительности быстро стала предметом дискуссий и исследований, объясняется интересом, который с самого начала проявил к ней Планк. В научной автобиографии Планк рассказал о тех причинах, которые вызвали его интерес к теории Эйнштейна: «Больше всего меня привлекало то, что представлялась возможность получить абсолютные, инвариантные результаты, непосредственно следующие из предложенных теорем» [P5]. Поиск абсолюта — основная цель, которую преследовал Планк в науке,— получил новую основу. «Подобно кванту действия в квантовой теории, скорость света является абсолютом, центральным моментом теории относительности». В зимний семестр 1905—1906 гг. Планк доложил работу Эйнштейна на физическом коллоквиуме в Берлине. На лекции присутствовал его ассистент М. Лауэ. Как и Планк, Лауэ стал одним из первых сторонников теории относительности, опубликовал в 1907 г. отличную статью [L1] об опыте Физо, внес большой вклад в дальнейшую разработку теории и написал первую монографию, посвященную СТО [L4]. Планк обсуждал также некоторые следствия СТО на конференции, состоявшейся в сентябре 1906 г. [P6]. Кроме того, первая диссертация по СТО была защищена именно под его руководством [M3].

Насколько я знаю, первая работа по СТО, написанная не Эйнштейном, также принадлежит Планку [P4]. Среди новых полученных им результатов хотелось бы в первую очередь отметить соотношение для импульса и скорости:

$$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}, \tag{7.23}$$

законы преобразования

$$\left.\begin{aligned} p_x' &= \gamma(p_x - vE/c^2), \quad p_y' = p_y, \\ p_z' &= p_z, \quad E' = \gamma(E - vp_x) \end{aligned}\right\} \tag{7.24}$$

и вариационный принцип релятивистской механики точки

$$\delta \int L\,dt = 0, \tag{7.25}$$

$$L = \gamma m c^2. \tag{7.26}$$

Планк вывел уравнение (7.23) из действия электромагнитного поля на заряженную точечную частицу, переписав уравнения (7.15) и (7.16) в виде $d(m\gamma x')/dt' = K'$. Непосредственный вывод уравнения (7.23) из закона сохранения энергии-импульса был дан лишь в 1909 г. [L5].

Среди других ранних статей, посвященных теории относительности, следует отметить работу Эренфеста 1907 г. [E17], в которой он впервые поставил важный вопрос: как применить преобразования Лоренца к твердому телу?

Первым использовал СТО в квантовой теории также Планк. Он указал, что действие является инвариантом не только для механики точки, для которой оно записывается как $\int L\,dt$ в уравнении (7.25), но и в общем случае. Отсюда он сделал вывод, что его постоянная h есть релятивистский инвариант. «Очевидно, что благодаря такой теореме значение принципа наименьшего действия приобретает новый смысл» [P4, разд. 12] — этот вывод мог бы сделать и Эйнштейн, исходя из уравнений (7.13), (7.18) и (7.19).

Не только теоретики сразу обратили внимание на теорию относительности. Еще в 1906 г. экспериментаторы поставили перед собой задачу определить, справедливо ли соотношение

$$E = \gamma mc^2, \tag{7.27}$$

связывающее полную энергию и скорость β-излучения, о чем пойдет речь в § 7.5.

Публикация в 1905 г. статей по СТО ознаменовала окончание «блестящей изоляции» Эйнштейна в патентном бюро. Начиная с 1906 г., в Берн зачастили гости, чтобы обсудить с автором его теорию. Одним из первых (возможно, самым первым) был М. Лауэ. «Встретивший меня молодой человек произвел очень неожиданное впечатление. Я не мог поверить тому, что разговариваю с создателем теории относительности»,— вспоминал впоследствии Лауэ [S2, с. 130][17]). Приезжали и другие молодые ученые. Эйнштейн получил письмо из Вюрцбурга от Иоганна Якоба Лауба с просьбой разрешить поработать с ним в течение трех месяцев [L6]; за время их совместной работы в Берне Эйнштейн впервые опубликовал статью в соавторстве с другим ученым [E18, E19]. Из Бреслау (сейчас Вроцлав) приехал Рудольф Ладенбург. В Принстоне они с Эйнштейном стали близкими друзьями. Но в те далекие годы сторонников теории относительности было еще совсем немного. В июле 1907 г. Планк писал Эйнштейну: «Сейчас, когда сторонников СТО можно пересчитать по пальцам, вдвойне важно, чтобы между нами не было разногласий» [P7].

---

[17]) До приезда в Берн М. Лауэ совершил очередное восхождение. Об этом Эйнштейн отозвался так: «Не понимаю, что за удовольствие лазить по горам?» [S2, с. 131].

Затем, в 1908 г., Герман Минковский прочитал лекцию «Пространство и время». В 1902 г. Минковский, бывший преподаватель Эйнштейна из Цюриха, переехал в Геттинген. Там 5 ноября 1907 г. он провел в университете коллоквиум, посвященный СТО, в ходе которого отождествил преобразования Лоренца с псевдовращениями, для которых

$$\left.\begin{array}{l} x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad \text{есть инвариант,} \\ x_4 = ict, \end{array}\right\} \tag{7.28}$$

где x_1, x_2, x_3 — пространственные переменные. Наиболее важным из высказанных на коллоквиуме соображений было то, что электромагнитные потенциалы, равно как и плотности заряда-тока, есть векторы по отношению к группе Лоренца, в то время как напряженность электромагнитного поля представляет собой тензор второго ранга («трактор», как назвал его Минковский). Вскоре Минковский опубликовал подробную статью [М5], в которой впервые уравнения Максвелла — Лоренца приведены в современной тензорной форме; аналогичным образом рассмотрена механика точки, а также обсуждена с позиций СТО непригодность ньютоновой теории тяготения. В этой статье впервые появились такие термины, как *пространственноподобный вектор*, *времениподобный вектор*, *световой конус* и *мировая линия*.

Так началось великое формальное упрощение СТО. Вначале это не произвело на Эйнштейна большого впечатления, он счел запись своей теории в тензорной форме «излишней ученостью»[18]). Однако в 1912 г. он усвоил тензорные методы, а в 1916 г. выразил признательность Минковскому за то, что тот значительно облегчил переход от СТО к общей теории относительности [Е20].

Лекция «Пространство и время», прочитанная Минковским в Кельне в 1908 г., начинается словами [19]): «Взгляды на пространство и время, которые я собираюсь изложить, основаны на результатах экспериментальной физики, и в этом их сила. Взгляды эти радикальны. Отныне пространство само по себе и время само по себе уходят в мир теней, и сохраняет реальность лишь их своеобразный союз». Заканчивается лекция так: «Мне кажется, что абсолютная справедливость мирового постулата [т. е. постулатов теории относительности] есть настоящее ядро электромагнитной картины мира. Открытая Лоренцем и развитая Эйнштейном, она предстала перед нами во всем своем блеске» [М6]. Неудивительно, что такие вступление и заключение вызвали волнение среди слушателей, хотя, возможно, не все поняли суть выступления. Минковский не дожил до публикации своей

---

[18]) Эйнштейн сказал это В. Баргману, которому я благодарен за данное сообщение.

[19]) Текст выступления на коллоквиуме был подготовлен к печати Зоммерфельдом. Он был опубликован в 1915 г., спустя несколько лет после кончины Минковского [М4]. Это выступление не включено в собрание трудов Минковского, вышедшее в 1911 г. [М5].

лекции. В январе 1909 г. он скончался от аппендицита. В статье, посвященной памяти Минковского, Гильберт назвал его «даром небес» [H2].

Начиная примерно с 1908 г., известность Эйнштейна в научных кругах начала расти. В июле 1909 г. Женевский университет удостоил звания почетного доктора «господина Эйнштейна, эксперта Федерального бюро интеллектуальной собственности». Я не знаю, за что он был удостоен этого звания. Можно лишь предполагать, что к этому приложил руку Шарль Гюи, профессор экспериментальной физики в Женеве. Так как Гюи в основном занимался зависимостью энергии β-излучения от его скорости, не исключено, что Эйнштейн получил первое из многих почетных званий за теорию относительности.

В начале 1912 г. Вильгельм Вин, лауреат Нобелевской премии по физике 1911 г., направил в Стокгольм следующую рекомендацию по присуждению премии за 1912 г. (гл. 29): «Предлагаю разделить премию поровну между Г. А. Лоренцем из Лейдена и А. Эйнштейном из Праги. В качестве обоснования этого предложения я хотел бы заявить следующее. Принципы теории относительности позволили устранить имевшиеся в электродинамике трудности, кроме того, они дали возможность предсказать для движущейся системы все электромагнитные явления, происходящие в покоящейся системе». После перечисления некоторых основных черт теории Вин продолжает: «С чисто логической точки зрения принцип относительности следует считать одним из крупнейших достижений теоретической физики. С точки зрения подтверждения теории экспериментом ситуация напоминает положение с опытным подтверждением закона сохранения энергии. [Теория относительности] была создана индуктивным путем после того, как закончились неудачей все попытки обнаружить абсолютное движение... Лоренца следует считать первооткрывателем математического содержания принципа относительности, в то время как Эйнштейну удалось свести его к простым правилам. Поэтому заслуги обоих исследователей нужно считать сопоставимыми...».

И тогда, и позднее у СТО были противники. Однако, как видно из прекрасного резюме Вина, настоящим профессионалам понадобилось немного времени для того, чтобы понять, насколько большим достижением стало создание СТО.

§ 7.4. Эйнштейн и СТО после 1905 г.

В разд. V обзорной статьи Эйнштейна 1907 г., посвященной СТО, упоминается тяготение. Там содержится следующая фраза: «И в этом случае [т. е. при наличии тяготения] для определения понятия одновременности можно применять принцип постоянства скорости света, если ограничиться очень малыми световыми путями» [E3]. Эйнштейн уже тогда знал, что СТО — это лишь начало (см. гл. 9). Этим в основном объясняется тот факт, что

СТО как таковая перестала пребывать в центре его интересов. Кроме того, не в его правилах было заниматься техническим развитием основных идей. Вдобавок ко всему, с 1908 г. примерно до 1911 г. его в основном интересовала квантовая теория, а не теория относительности (см. гл. 10).

К 1909 г. Эйнштейн закончил работу над следствиями СТО, в последующие годы им было написано лишь несколько обзорных статей по СТО, поэтому я ограничусь здесь кратким перечислением его работ по данной теме, написанных с 1905 по 1910 г. Статьи Эйнштейна, а также других ученых обсуждаются Паули [P1].

1906 г. Рассмотрение движения центра тяжести в СТО [E10] (подробно этот вопрос обсуждался в [M1]).

1906 г. Краткое сообщение о возможности определения значения $1 - v^2/c^2$ из экспериментов с β-излучением [E21].

1907 г. Соображение о возможности обнаружения поперечного эффекта Доплера [E5].

1907 г. Краткий ответ на вопрос, заданный Эренфестом по поводу поведения твердых тел: «Как динамику, так и кинематику абсолютно твердого тела... следует считать пока неизвестной» [E22].

1907 г. Ранее Эйнштейн получил для кинетической энергии соотношение $mc^2(\gamma - 1)$. Теперь он ввел выражение γmc^2 для полной энергии. Более того, он получил законы преобразования энергии и импульса в присутствии внешних сил (т. е. для открытых систем) [P1, разд. 43]. Эйнштейн возвратился и к проблеме твердого тела: «...если даже релятивистская электродинамика верна, мы еще очень далеки от создания динамики поступательного перемещения твердого тела» [E23]. В этой статье Эйнштейн также коснулся влияния выдвинутой им недавно гипотезы световых квантов на справедливость уравнения Максвелла для свободного поля. Он считал, что эти уравнения справедливы до тех пор, пока значение электромагнитной энергии или ее переноса не слишком мало, точно так же, как законы термодинамики справедливы лишь в том случае, если можно пренебречь эффектами типа броуновского движения (флуктуациями).

1907 г. Обзорная статья [E3] — промежуточная между СТО и ОТО. Среди вопросов, обсуждаемых в этой статье и не упоминавшихся выше, следует отметить: 1) замечание о том, что полный электрический заряд замкнутой системы есть лоренцев инвариант; 2) комментарий по поводу экспериментов Кауфмана с β-излучением, о чем пойдет речь в следующем параграфе; 3) обсуждение релятивистской термодинамики [20]).

---

[20]) Ранее выполненные на эту тему работы обсуждаются в [P1, разд. 46—49]; см. также [E24]. Острая критика этих работ содержится в [O2]. Так как данная проблема до сих пор толкуется по-разному (см., например, [L7]), историческую оценку ее давать пока рано.

1908—1910 гг. Статьи по релятивистской электродинамике весомой среды, написанные совместно с Лаубом [E18, E19] (см. [P1, разд. 33, 35]). Комментарий к этим статьям вышел в свет в 1909 г. [E25]. В 1910 г. Эйнштейн опубликовал краткое замечание о нерелятивистском определении пондеромоторной силы в магнитном поле [E26].

Этим завершается краткое перечисление работ Эйнштейна, посвященных СТО. (Я уже упоминал, что в 1935 г. [E12] и вновь в 1946 г. [E13] он другими методами получил соотношение $E = mc^2$.) В последующие годы Эйнштейн неоднократно выступал с обзорными статьями по СТО; впервые он дал такой обзор в лекции на физической конференции в 1909 г. [E27], затем в 1910 [E28], 1911 [E29], 1914 [E30], 1915 [E31] и в 1925 гг. [E32]. СТО, естественно, обсуждается и в его книге «Сущность теории относительности» [E33]. Первая из написанных им газетных статей в основном посвящена СТО [E34]; кроме того, он написал ряд обзоров посвященных данной теме книг Бриллa [E35], Лоренца [E35] и Паули [E36].

Итак, мы рассмотрели положение дел, начиная с XIX в. до событий, предшествовавших появлению статьи 1905 г. по СТО и ее продолжения, а также познакомились с первыми откликами на новую теорию. Я не буду в дальнейшем касаться развития классической СТО. Влияние этой теории на современную физику обсуждается в статьях Вольфганга Пановского [P8] и Эдварда Парселла [P9].

Незатронутые до сих пор вопросы, касающиеся в основном вкладов в развитие СТО Эйнштейна, Лоренца и Пуанкаре, будут рассмотрены в гл. 8, а пока обсудим проблему электромагнитной массы.

§ 7.5. Электромагнитная масса: первое столетие [21])

Задолго до того, как стало известно, что эквивалентность инертной массы и энергии непосредственно вытекает из релятивистских постулатов и что эквивалентность распространяется на все формы энергии; задолго до того, как стало ясно, что считавшиеся независимыми законы сохранения энергии и массы есть единый закон сохранения массы-энергии, из динамических, а не из кинематических соображений было выработано понятие электромагнитной массы — особой формы энергии, появляющейся при рассмотрении движения заряженной частицы, которая взаимодействует с собственным электромагнитным полем. Сейчас, когда пишутся эти строки, понятию электромагнитной массы исполнилось 100 лет. Давно потеряли всякое значение исследования проблемы собственной энергии электрона, выполненные такими

[21]) Часть материала этого параграфа использовалась ранее в статье, посвященной истории теории электрона [P10].

учеными, как Абрагам, Лоренц и Пуанкаре. Но, как и в те дни, мы все еще не понимаем ее сути.

«Проблему электромагнитной массы проще всего объяснить, прибегнув к аналогии из области гидродинамики»,— говорил в 1906 г. Лоренц [L8, с. 40], выступая перед студентами Колумбийского университета. Он имел в виду движение твердой идеально гладкой сферы массой m, равномерно перемещающейся со скоростью v в неограниченной несжимаемой идеальной жидкости.

Движение такого типа рассматривалось Стоксом еще в 1842 г. [S3]. Стокс показал, что кинетическая энергия E и импульс p данной системы задаются выражениями $E = mv^2/2$ и $p = mv$, где $m = m_0 + \mu$. Параметр μ — присоединенная, или гидродинамическая масса — есть функция радиуса сферы и плотности жидкости. Упоминаемая Лоренцем аналогия была впервые подмечена Дж. Дж. Томсоном, который в 1881 г. исследовал задачу «...движения заряженной сферы в неограниченном пространстве, заполненном средой с удельной электрической постоянной K... Сопротивление [движению сферы] ...должно соответствовать теоретически рассчитанному сопротивлению, которое испытывает твердое тело, движущееся в идеальной жидкости» [T2]. Томсон рассчитал кинетическую энергию системы для малых скоростей и обнаружил, что она имеет вид $E = mv^2/2$, где $m = m_0 + \mu$: «Влияние электризации таково, как если бы масса сферы возрастала...». Таким образом, он открыл электромагнитную массу μ, хотя и не дал ей такого наименования. Читателю, несомненно, доставит удовольствие повторить вслед за Томсоном расчет μ для Земли, электризуемой без разряда до максимального потенциала.

В ходе лекции в Колумбийском университете Лоренц отметил: «В случае экспериментов с шариком, движущимся в идеальной жидкости, мы должны были ограничиваться опытами, в ходе которых измерялись значения внешних сил, действующих на тело, а также вызываемое их действием ускорение; при этом удается определить эффективную массу $[m_0 + \mu]$, но не m_0 и $[\mu]$ по отдельности. Очень важно, что при экспериментальном изучении движения электрона мы можем продвинуться дальше. Это связано с тем, что электромагнитная масса не постоянна, а возрастает со скоростью» [L8, с. 40].

Вскоре после того, как Томсон выполнил свои расчеты, стало ясно, что выражение для энергии заряженной сферы будет иметь более сложный вид, чем $mv^2/2$, если учесть эффекты порядка v/c (см., например, [H3, S4, S5]). Расчеты для заряженной твердой сферы, о которых упоминал в своей лекции Лоренц, были выполнены в Геттингене Максом Абрагамом; эти результаты как будто подтверждались другими опытами, проведенными также в Геттингене его другом Вальтером Кауфманом (подробно см. в [G1]).

В научной судьбе этих двух ученых есть что-то драматическое. В 1897 г. Кауфман провел ряд отличных экспериментов

с катодными лучами, что позволило ему заявить: «Если сделать вроде бы разумное предположение о том, что движущимися частицами являются ионы, то отношение e/m должно было бы иметь различные значения для разных веществ, а отклонение [электрическим и магнитным полями] зависело бы от природы электродов или природы газа [в газоразрядной трубке]. На самом деле это не так. Более того, простой расчет показывает, что такое толкование наблюдаемого отклонения требует, чтобы значение e/m было порядка 10^7, в то время как даже для водорода это значение составляет лишь 10^4» [К2]. Добавь Кауфман всего одну фразу к этой статье, законченной в апреле 1897 г., он вошел бы в историю как человек, независимо от других открывший электрон. Тридцатого числа того же месяца Дж. Дж. Томсон выступил перед Королевским обществом с лекцией о катодных лучах, в ходе которой доложил об аналогичных результатах, полученных тем же методом, но в конце дал совершенно четкий вывод: «Эти результаты, по-видимому, подкрепляют гипотезу о том, что переносчики заряда по размеру меньше атома водорода» [Т3]. Мне кажется, что работа Кауфмана также заслуживает того, чтобы о ней помнили, хотя Кауфман, в отличие от Томсона, не осмелился сделать решающий шаг на пути к созданию новой физики частиц.

Абрагам был очень одаренным физиком-теоретиком (Эйнштейн всерьез рассматривал его как своего преемника в Цюрихе до переезда в Берлин), но ему было суждено стать научным противником Эйнштейна как в СТО, так и в ОТО и оба раза потерпеть поражение. Мы еще встретимся с ним в гл. 13.

А пока вернемся к проблеме электромагнитной массы. Кауфман первым экспериментально исследовал зависимость энергии электрона от скорости. В 1901 г. он опубликовал на эту тему статью, озаглавленную «Отклоняемость лучей Беккереля [т. е. β-излучения] в электрическом и магнитном полях и кажущаяся масса электрона» [К3]. Вдохновленный этими исследованиями, Абрагам вскоре дал полный расчет электромагнитной энергии E_{elm} и электромагнитного импульса p_{elm} электрона, считающегося твердой сферой, с зарядом e и радиусом a при условии равномерного распределения заряда ($\beta = v/c$, $\mu = 2e^2/3ac^2$):

$$E_{\text{elm}} = \frac{e^2}{2a}\left(\frac{1}{\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right) \approx \frac{e^2}{2a} + \frac{1}{2}\mu v^2 + \ldots, \qquad (7.29)$$

$$p_{\text{elm}} = \frac{e^2}{2ac\beta}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right) \approx \mu v + \ldots \qquad (7.30)$$

На 74-й сессии Общества испытателей природы, проходившей в Карлсбаде в сентябре 1902 г., Кауфман доложил о последних полученных им экспериментальных результатах [К4]. Сразу же после него с изложением своей теории выступил Абрагам [А1]. Кауфман сделал вывод о том, что «...зависимость [E от v] в точности соответствует формуле Абрагама». Абрагам сказал: «От-

ные становится необходимым с самого начала строить динамику электрона на основе электромагнетизма» (в 1903 г. он опубликовал свою основную статью, посвященную твердому электрону [A2]). Теперь понятно, что имел в виду Лоренц в колумбийской лекции — если бы оказалось, если бы только действительно оказалось, что зависимость E от v в точности такая, как задается выражением (7.29), то стали бы известны два факта: электрон является крошечной твердой сферой, а его масса имеет чисто электромагнитное происхождение.

Так дело обстояло до 1904 г., когда Лоренц предложил новую модель: покоящийся электрон представляет собой крошечную сферу, но в процессе движения он испытывает сокращение Фицджералда — Лоренца [L9]. Из такой модели следует зависимость от скорости, отличающаяся от уравнений (7.29) и (7.30):

$$E_{\text{elm}} = \gamma\mu_0 c^2(1+\beta^2/3) \approx \mu_0 c^2 + \mu_1 v^2/2 + \ldots, \tag{7.31}$$

$$p_{\text{elm}} = \gamma\mu v \approx \mu v + \ldots, \tag{7.32}$$

где $\mu_0 = 3\mu/4$, $\mu_1 = 5\mu/4$, а μ — такое же, как в уравнениях (7.29) и (7.30). Лоренц, узнав о результатах Кауфмана и их совпадении с теорией Абрагама, заметил: «...[его расчеты должны совпадать с экспериментом] ...почти так же хорошо ...если не будет особых возражений против предложенной мной теории»,— после чего провел такое сравнение и заключил, что причин для тревоги нет.

Для того чтобы понять уравнения Лоренца (7.31) и (7.32), а также предположения Пуанкаре, касающиеся модификации этих результатов, полезно несколько отклониться от исторической последовательности событий и получить уравнения Лоренца из преобразований тензора плотности электромагнитной энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ [P10]. Тогда (в метрике Минковского[22])) можно записать

$$E_{\text{elm}} = \int T_{44}\,d\mathbf{x} = \gamma\Big[\int T_{44}(0)\,d\mathbf{x}_0 - \beta^2 \int T_{11}(0)\,d\mathbf{x}_0\Big], \tag{7.33}$$

$$p_{\text{elm}} = -\frac{\mathrm{i}}{c}\int T_{14}\,d\mathbf{x} = \frac{\gamma v}{c^2}\Big[\int T_{44}(0)\,d\mathbf{x}_0 - \int T_{11}(0)\,d\mathbf{x}_0\Big], \tag{7.34}$$

где индекс нуль относится к покоящейся системе. Так как след тензора $T_{\mu\nu}$ равен нулю, а покоящаяся система пространственно изотропна, уравнения (7.31) и (7.32) непосредственно следуют из этих преобразований.

К понятию электромагнитной массы привел динамический, а не кинематический подход. Динамический же, а не кинематический подход заставил Пуанкаре видоизменить модель Лоренца.

---

[22]) Предполагаем, как обычно, что электрон движется в направлении x. Уравнения (7.33) и (7.34) были впервые предложены в 1911 г. М. Лауэ [L10].

В краткой статье, опубликованной в июне 1905 г., Пуанкаре заявил: «Возможным объяснением сжатия электрона... [может быть то], что деформируемый и сжимаемый электрон подвержен постоянному внешнему давлению, работа которого пропорциональна изменению объема этого электрона» [P11]. В июльской статье 1905 г. он добавил: «Это давление пропорционально четвертой степени экспериментально установленной массы электрона» [P12]. В гл. 6 я уже обсуждал кинематическую часть этих двух статей. Гораздо более важной была динамическая часть — «Сокращение электронов». Не случайно обе статьи озаглавлены одинаково — «О динамике электрона».

На современном языке динамическая задача Пуанкаре может быть сформулирована следующим образом. Можно ли получить уравнения для электрона Лоренца и его собственного поля, исходя из релятивистски инвариантного принципа действия, и *доказать*, что этот электрон, имеющий в состоянии покоя сферическую форму, становится при равномерном движении эллипсоидом, как то *предположил* Лоренц? Пуанкаре первым показал, что это невозможно. Но он же показал, как выйти из создавшегося положения. «Если мы хотим сохранить [теорию Лоренца], избегнув недопустимых противоречий, необходимо предположить существование особой силы, которая объясняла бы как наличие сокращения [в направлении движения], так и неизменность размеров по двум [другим] осям» [P12].

Пространные рассуждения Пуанкаре можно вместить в несколько строк, если прибегнуть к помощи тензора $T_{\mu\nu}$. Запишем уравнение (7.31) в виде

$$E_{\text{elm}} = \gamma\mu c^2 - PV, \tag{7.35}$$

где $V = 4\pi a^3/3\gamma$ — (сокращенный) объем электрона, $P = 3\mu c^2/16\pi a^3$ — скалярное давление. Добавим к $T_{\mu\nu}$ член, равный $\rho P\delta_{\mu\nu}$ — «давление Пуанкаре», где $\rho = 1$ внутри электрона и $\rho = 0$ вне. Этот член сокращается с членом $-PV$ в E_{elm} для всех скоростей, он не входит в выражение для p_{elm} и служит для определения требуемого сокращения. Предположим далее (как сделал Пуанкаре), что масса электрона является чисто электромагнитной. Тогда $\mu \sim e^2/a$ и $P \sim \mu/a^3 \sim \mu^4$, т. е. получаем результат, упоминавшийся выше. На современном языке это значит, что дополнительное давление превращает электрон конечных размеров в замкнутую систему. Пуанкаре даже не подозревал, насколько необходимы полученные на основе его модели соотношения

$$E_{\text{elm}} = \gamma\mu c^2, \quad p_{\text{elm}} = \gamma\mu v \tag{7.36}$$

(см. [M7], где подробно рассмотрен ход рассуждений Пуанкаре).

Вернемся теперь к Кауфману. Вдохновленный последними теоретическими достижениями, он уточняет свои эксперименты и в 1909 г. объявляет о новых полученных результатах: «Резуль-

таты измерений несовместимы с постулатом Лоренца — Эйнштейна. Уравнение Абрагама и уравнение Бухерера [23]) в равной степени хорошо совпадают с результатами наблюдений...» [K5].

Эти выводы вызвали волнение среди физиков-теоретиков. На физической конференции 1906 г. Планк доложил о проведенном им анализе полученных Кауфманом данных [P13]. Он не смог обнаружить явных просчетов и занял выжидательную позицию. Так же в 1908 г. поступил и Пуанкаре [P14]. Лоренц заколебался: «Эксперименты, очевидно, противоречат идее сокращения в том виде, как я ее предложил. Хотя весьма вероятно, что от этой идеи придется полностью отказаться, я считаю целесообразным еще подумать над ней...» [L8, с. 40]. Эйнштейн остался непоколебимым: «В. Кауфман с тщательностью, достойной восхищения, определил связь между [отклонением электрическим и магнитным полями] для β-лучей... Планк, применяя другой метод вычислений, получил результаты, полностью согласующиеся с результатами Кауфмана... Необходимо еще отметить, что теории движения электронов Абрагама и Бухерера дают кривые, согласующиеся с экспериментальной кривой значительно лучше, чем кривая, соответствующая теории относительности. Однако, по нашему мнению, эти теории вряд ли достоверны, поскольку их основные предположения о массе движущегося электрона не вытекают из теоретической системы, охватывающей более широкий круг явлений» [E3]. Вскоре после того, как были написаны эти строки, Бухерер экспериментально подтвердил справедливость соотношения $E = m\gamma c^2$ [B7]. Минковский был в восторге. Вводить твердый электрон в теорию Максвелла, сказал он, все равно, что идти на концерт, заткнув уши ватой [M8]. Однако окончательно проблема не была решена. Вин в письме, направленном в начале 1912 г. в Нобелевский комитет, отмечал: «По поводу последних экспериментов с катодными и β-лучами я должен сказать, что не считаю их результаты окончательными. Эксперименты очень тонки, и нельзя быть уверенным в том, что удалось устранить все источники ошибок». Окончательно экспериментальный вердикт в пользу теории относительности был вынесен в 1914—1916 гг.[24]).

Специальная теория относительности развеяла мечты представителей классической физики о возможности продемонстрировать динамическое происхождение массы электрона с помощью зависимости между энергией, импульсом и скоростью частицы. Эти зависимости — чисто кинематические. Классическое представ-

---

[23]) Альфред Бухерер [B5] и Ланжевен [L11] независимо предложили модель протяженного электрона с сокращением Лоренца — Фицджеральда, но с постоянным объемом. Эта модель в дальнейшем анализировалась Пуанкаре [P12] и Эренфестом [E37]. В 1908 г. Бухерер сообщил Эйнштейну, что в результате проведенных им экспериментов он отказался от своей модели в пользу теории относительности [B6].

[24]) См. [P1, разд. 29], где содержится перечень литературы, посвященной этим экспериментам, до 1918 г.

ление о частице как о мельчайшей сфере конечного размера также кануло в Лету. Квантовая теория поля продемонстрировала, что у частиц все же есть структура, как на то указывают квантовые флуктуации. Недавно с помощью единых теорий поля удалось показать, что масса электрона не является чисто электромагнитной.

Но мы так и не знаем происхождения массы электрона.

Глава 8. ГРАНЬ ИСТОРИИ

Новый метод мышления. Шестого апреля 1922 г. состоялось заседание французского философского общества (одним из основателей которого был Анри Пуанкаре), на котором обсуждались специальная и общая теории относительности. Среди участников заседания были математики Эли Картан, Жак Адамар, Поль Пенлеве, физики Жан Беккерель, Альберт Эйнштейн и Поль Ланжевен, философы Анри Бергсон, Леон Брюнсвик, Эдуар Леруа и Эмиль Мейерсон. В ходе обсуждения Бергсон выразил свое восхищение работами Эйнштейна: «Я считаю [эти работы] не только новой физикой, но и в некотором отношении, новым методом мышления» [B1].

СТО вызвала к жизни новые философские течения. О ней даже писали детские стишки, такие, например, как о юной леди по имени Кэт[1]). Но основным и самым главным было то, что эта теория привнесла новый метод мышления в саму физику, новый потому, что он заставил пересмотреть укоренившиеся в физике и химии представления классического периода. В физике основной элемент новизны заключался, во-первых, в том, что измерение пространственных и временных интервалов требовало гораздо более тщательного определения понятий, чем считалось необходимым раньше, а во-вторых, в том, что законы классической механики оказались справедливыми лишь при скоростях $v \ll c$. Для химии новизна заключалась в том, что закон сохранения массы, установленный Лавуазье, и правило соотношения весов Дальтона есть лишь приближения, но настолько хорошие, что в классической химии не требовалось ничего менять. Итак, СТО превратила ньютонову механику и классическую химию в теории, лишь приблизительно описывающие реальность, но не преуменьшила их значения, а уточнила его в процессе развития науки.

Сегодня такой пересмотр представляется безболезненным, он легко укладывается в учебные курсы. Кажется, что Эйнштейн осуществил его внезапно, тогда как на самом деле этому пред-

---

[1]) Юная леди по имени Кэт
Двигалась много быстрее, чем свет.
Но попадала всегда не туда...
Быстро помчишься —
Придешь во вчера.

Перевод А. Базя.— *Примеч. пер.*

шествовали несколько лет мучительных размышлений. Для него эти постулаты стали очевидными, как только он их предложил. Когда я разговаривал с ним об этом переходном периоде, он отвечал странными безличными фразами. Создание СТО он называл «шагом».

Для Лоренца и Пуанкаре дело обстояло иначе. Каждый из них мучительно размышлял над теми же проблемами, сделал не один важный шаг на пути к нахождению решения и в ходе этих размышлений достиг глубокого проникновения в суть вещей. Но последнего шага ни один из них сделать не смог. Позднее трое ученых — Эйнштейн, Лоренц и Пуанкаре — по-разному относились к СТО, и представляется интересным познакомиться с их взглядами. Почему все-таки Эйнштейн не хотел признавать влияния на ход его мыслей опыта Майкельсона — Морли? Почему Лоренц так и не отказался от эфира? Почему Пуанкаре так и не понял СТО? Все эти вопросы выводят нас на грань истории.

Естественно, но неверно предположить, что использование термина *грань истории* дает возможность четко определить, что называется историей. История рассматривает события прошлого. История какого-то периода есть описание этого периода на основе выборочного использования дат и фактов, извлекаемых из некоторого объема информации, который, естественно, предположить, неполон. Фактор отбора является столь же необходимым, сколь и неизбежно субъективным. Поэтому нельзя говорить о *единственно верной* истории какого-то периода. Мало того, что историк может ошибиться, часто он и сам не уверен в своей правоте. Кроме того, знание отдельных фактов и дат необходимо, но не достаточно, если не ограничиваться (а ограничиваться нельзя) только догадками о том, *что* происходило, а и пытаться понять, *как* «это» происходило. При изучении истории открытий огромный интерес вызывают вопросы типа: «Почему A создал то-то; почему B сразу согласился с открытием A; почему C сопротивлялся новым идеям, предложенным A?». За долгие годы занятий теоретической физикой я встречал многих A, B, C, но часто затруднялся ответить на такие вопросы, даже если речь шла о теориях, не столь глубоких, как специальная теория относительности. Чтобы оценить такие явления, как создание нового, его принятие или непринятие как в науке, так и в других областях, необходимо кроме фактов знать и то, как мыслят эти A, B и C. Но как определить, знаешь ты это или нет?

Ответ на такие вопросы в руки не дается и потому особо будоражит воображение, но с самими вопросами дело обстоит по-иному. Возвращаясь к Эйнштейну, Лоренцу и Пуанкаре, я могу сказать, что поставленные здесь вопросы есть результат терпеливого изучения их работ. Вопросы выкристаллизовались в ходе исследования исторического процесса, и не будет слишком большой смелостью назвать их частью истории. Ответы же на них, по моему мнению, лежит за гранью истории. Где-то между вопросом и ответом и проходит грань истории, которой я сейчас дал

гораздо более четкое определение, чем понятию истории. В ходе дальнейшего изложения, пытаясь дать ответ, я буду иногда несколько преступать эту грань.

Но сначала еще несколько фактов.

Эйнштейн и научная литература. Статья Эйнштейна 1907 г. [E1] для журнала «Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik» появилась по инициативе Иоханнеса Штарка, основателя и редактора этого журнала. Отвечая согласием на предложение написать обзорную статью, Эйнштейн писал Штарку: «К сожалению, я не в курсе всего, что написано на данную тему, так как в мое свободное время библиотека закрыта. Помимо своих статей, я знаком с работой Лоренца (1904), одной статьей Кона, одной работой Мозенгейля и двумя статьями Планка[2]). Я был бы очень благодарен, если бы Вы указали мне другие относящиеся к данной теме публикации, если они Вам известны» [E2]. Это письмо, так же как и более раннее письмо Эйнштейна Бессо [E3], демонстрирует, что сотруднику патентного бюро было трудно следить за литературой. В ответе на письмо Эйнштейна Штарк упоминает работы Планка, Лауэ, свою и добавляет: «Помимо этих и перечисленных Вами работ я также не знаю никаких других» [S1]. Таким образом, ни Эйнштейн, ни Штарк не были знакомы с пространной работой Пуанкаре, посвященной теории относительности, законченной в июле 1905 г. и опубликованной в 1906 г. в «Трудах математического общества Палермо» [P1]. Минковский упоминал об этой работе 5 ноября 1907 г., выступая с лекцией (§ 7.3) перед Математическим обществом Геттингена [M1]. Итак, несомненно, что эта публикация уже вышла в свет к декабрю 1907 г., когда Эйнштейн заканчивал свою обзорную статью, и тем более, к марту 1908 г., когда он внес в нее некоторые поправки и добавления [E4]. Тем не менее, в особенности с учетом переписки между Эйнштейном и Штарком, я не вижу оснований считать, что в 1907 г. Эйнштейн был знаком с работой Пуанкаре и решил ее игнорировать.

Полагаю, что знакомиться с новыми публикациями Эйнштейну и впрямь было затруднительно, однако не это повлияло на его отношение к научной литературе. Дело в том, что она его мало заботила. Вот что он, например, писал во вступлении к статье 1906 г.: «Представляется естественным, что последующее могло быть уже частично выяснено другими авторами раньше; однако, принимая во внимание, что затронутые здесь вопросы обсуждаются с новой точки зрения, я позволил себе отказаться от весьма затруднительного для меня просмотра литературы, надеясь, что этот пробел будет восполнен другими, как это уже было любезно сделано господами Планком и Кауфманом в отношении моей первой работы о принципе относительности» [E5]. Сказать, что это не заносчивость, можно в том и только в том случае, если считать заносчивость признаком неуверенности в себе. Я же в этих сло-

[2]) Все эти работы упоминались в гл. 6 и 7.

вах вижу лишь радостный задор, абсолютную уверенность в себе и явное отсутствие такта [3]).

Итак, Эйнштейн не знал о работе Пуанкаре, посвященной принципу относительности, до 1908 г. Я упоминал в § 6.2 о том, что в 1905 г. Эйнштейн уже познакомился с книгой Пуанкаре «Наука и гипотеза», в которой высказывалось предположение о невозможности обнаружить движение Земли относительно эфира для членов порядка v/c и критиковались наивные представления об одновременности. Однако было бы неверно утверждать, что эти важные соображения Пуанкаре повлияли на содержание июньской статьи Эйнштейна. Кто-либо другой на его месте, возможно, воспользовался бы первым представившимся случаем, чтобы упомянуть о работах Пуанкаре. Но мне кажется, что в 1905 г. у Эйнштейна для этого не было веских причин. Дальше я расскажу о том, как Эйнштейн отзывался о Пуанкаре в последующие годы, а пока отмечу, что Пуанкаре упоминается в работах Эйнштейна по теории относительности лишь однажды [4]) — в лекции «Геометрия и опыт», прочитанной в 1921 г. [E7], где он высоко отзывается об идеях в области неевклидовой геометрии, высказанных «оригинальным и глубоким мыслителем Анри Пуанкаре», идеях, которые, кстати, излагаются в гл. 3 книги «Наука и гипотеза».

Лоренц и эфир. Для Лоренца простота означала простоту динамики. В качестве типичного примера его научного стиля процитирую следующее высказывание по поводу результатов, полученных в 1901—1906 гг. Кауфманом при исследовании природы электромагнитной массы электрона (§ 7.3): «Для простоты следовало бы предположить справедливость вывода или, если хотите, гипотезы Кауфмана, сводящейся к тому, что отрицательно заряженные электроны вообще не имеют материальной массы. Это, несомненно, один из важнейших результатов, полученных современной физикой...» [L1, с. 43]. Мне кажется, что Лоренц до конца дней придерживался представления о чисто электромагнитном происхождении массы электрона.

Эти слова были сказаны Лоренцом в ходе его колумбийской лекции 1906 г., публикация которой была задержана на три года, «...так как было желательно продолжить разработку этой проблемы» [L1, предисловие]. Несмотря на значительную задержку, «...принцип относительности Эйнштейна не был отражен должным образом» (см. там же). Это действительно так. Например, Лоренц по-прежнему считал сокращение размеров стержней динамиче-

---

[3]) Когда Эйнштейн хотел, он, видимо, мог найти нужную литературу. В его статье 1907 г. [E1] цитируется ряд журналов, в том числе даже «American Journal of Science» за 1887 г., в котором содержится сообщение об опыте Майкельсона — Морли. Но я бы не удивился, если бы узнал, что Эйнштейн просто переписал эти ссылки из работ Лоренца. Кроме того, в 1906 г. Эйнштейн упомянул [E6] одну из работ Пуанкаре [P2], о которой узнал из юбилейного сборника, посвященного Лоренцу.

[4]) Эйнштейн упоминает Пуанкаре, по крайней мере, еще один раз — в книге «Сущность теории относительности». — *Примеч. пер.*

ским эффектом. Нет никакого сомнения в том, что к тому времени он уже прочитал и усвоил работы Эйнштейна. Однако ни тогда, ни позднее он не согласился с тем, что они окончательно решают проблему эфира. С присущей ему ясностью он изложил свое кредо в лекции, прочитанной в 1913 г. в Гарлеме [L2]:

> «По мнению Эйнштейна, бессмысленно говорить о движении относительно эфира. Он также отрицает наличие абсолютной одновременности. Весьма примечательно, что такие представления об относительности и времени столь быстро получили признание.
>
> Принятие этих концепций в основном объясняется влиянием теории познания... Несомненно, что принятие или непринятие таких концепций в значительной степени зависит от того, насколько привлекательным представляется то или иное толкование явлений. Автор этих строк находит большое удовлетворение в старой концепции, в соответствии с которой эфир имеет хотя бы минимальную материальность, между пространством и временем можно провести четкую границу, а об одновременности можно говорить без дополнительных уточнений. В подтверждение последнего тезиса можно напомнить о присущей нам способности представлять себе произвольно большие скорости. При этом мы максимально приближаемся к концепции абсолютной одновременности.
>
> Наконец, смелое предположение о невозможности наблюдать скорости, большие скорости света, содержит гипотетическое ограничение, накладываемое на нашу способность к восприятию, которое не может быть принято безоговорочно».

Совершенно очевидно, что воображение Лоренца было воображением представителя классической физики. Свет имеет скорость c. Не представляет никакого труда вообразить себе скорость, равную, например, $c + 1$ км/с. Но представитель классической физики утверждает, что любая скорость, которую можно представить себе математически, достижима физически, а сторонник СТО не может с ним согласиться.

В моем представлении, Лоренц был признанным авторитетом в теоретической физике, он полностью усвоил все физические и математические аспекты СТО, но не мог расстаться с дорогим его сердцу классическим прошлым. Это отнюдь не означает, что такая позиция вызывала конфликты — наоборот, Эйнштейн и Пуанкаре всегда высоко отзывались о Лоренце, и тот отвечал им взаимностью. Лоренц, не колеблясь, признавал свои ошибки: «Основная причина, по которой я не смог предложить теории относительности, заключается в том, что я придерживался представления, будто лишь переменная t может считаться истинным временем, а предложенное мной местное время t' должно рассматриваться только в качестве вспомогательной математической величины»,—

писал он в добавлении ко второму изданию своих колумбийских лекций [L3]. В черновике письма[5]) Эйнштейну, написанном в январе 1915 г., Лоренц так отозвался о сокращении Фицджеральда — Лоренца: «Я отметил, что к этой гипотезе можно прийти, если распространить на другие силы то, что уже известно относительно влияния поступательного движения на электростатические силы. Если бы я акцентировал на этом внимание, то данная гипотеза не создавала бы впечатления, будто она выдвинута ad hoc». Лоренц так никогда полностью и не перешел от старой динамики к новой кинематике[6]).

Пуанкаре и третья гипотеза. В апреле 1909 г. Пуанкаре прочитал в Геттингене курс из шести лекций [P3]. В последней из них, озаглавленной «Новая механика», речь идет о теории относительности. Читая текст лекции впервые, удивляешься, почему нигде не упоминается имя Эйнштейна, хотя с момента создания СТО прошло уже четыре года. Однако при ближайшем рассмотрении убеждаешься, что это вполне объяснимо — Пуанкаре рассматривает не теорию относительности Эйнштейна.

Новая механика, по Пуанкаре, основана на трех гипотезах. Первая из них гласит, что ни одно тело не может достичь скорости, большей скорости света. Вторая гипотеза (пользуясь современным языком) утверждает, что во всех инерциальных системах отсчета законы физики должны выглядеть одинаково. Ну что ж, пока все в порядке. Но затем Пуанкаре вводит третью гипотезу: «Необходимо сделать третье предположение, еще более поразительное, которое гораздо труднее принять и которое в наибольшей степени противоречит нашему повседневному опыту. Тело, движущееся прямолинейно и равномерно, испытывает деформацию в направлении своего перемещения... Сколь странным это ни представляется, следует признать, что третья гипотеза полностью подтверждена». Ясно видно, что даже в 1909 г. Пуанкаре не знал, что сокращение размеров стержней является следствием двух постулатов Эйнштейна. Отсюда следует, что Пуанкаре не понял одного из фундаментальнейших положений СТО.

Может быть, не следует понимать высказывание Пуанкаре буквально? Предположить, что третья гипотеза была введена в чисто методических целях? Я лично думаю, что это не так. Более того, если перечитать его предыдущие статьи в свете этого высказывания, то видно, что он там одинаково рассматривал сокращение Фицджеральда — Лоренца. Повторю высказывание Пуанкаре, сделанное им во время выступления в Сент-Луисе в 1904 г. [P4]. Тогда он по сути предложил ввести первые два постулата и затем добавил: «Этого [подхода], к сожалению, недостаточно,

---

[5]) Этот черновик был обнаружен в 1979 г. в записных книжках Лоренца А. Кокс. Благодарю д-ра Кокс за то, что она обратила мое внимание на это письмо.

[6]) По словам Борна, «Лоренц... видимо, так никогда и не стал приверженцем релятивистской теории, хотя временами, чтобы избежать споров, на словах поддерживал идеи Эйнштейна» [B2, с. 198].

необходимы дополнительные гипотезы; надо допустить, что движущиеся тела испытывают однородное сокращение в направлении движения». В большой статье, опубликованной в «Rendiconti di Palermo» [P1], Пуанкаре подробно обсуждает преобразования Лоренца, но ни словом не упоминает о том, что из этих преобразований вытекает сокращение масштабов; основной акцент в статье сделан на динамику. Точно такой же подход использован и в популярном изложении теории относительности, опубликованном в 1908 г. [P5].

Моя личная оценка вклада Пуанкаре в создание теории относительности совпадает с оценкой, данной на парижской сессии Французского философского общества, уже упоминавшейся ранее: «Решение проблемы, которое предвосхитил Пуанкаре, было дано Эйнштейном в его статье 1905 г., посвященной специальной теории относительности. Он совершил революцию, которую предвидел Пуанкаре, в тот момент, когда казалось, что развитие физики вашло в тупик» [L5].

Уиттекер и история теории относительности. В 1910 г. Эдмунд Уиттекер опубликовал книгу, озаглавленную «История теорий эфира и электричества» [W1]. Этот труд охватывает период от Декарта до конца XIX в. Коллеги, лучше меня знакомые с этим периодом истории, подтверждают мое мнение о том, что это шедевр. Почти 40 лет спустя вышло в свет переработанное издание этой книги. Тогда же Уиттекер опубликовал второй том, посвященный периоду с 1900 по 1926 г. [W2]. Рассмотрение в нем СТО ясно показывает, что отсутствие у автора физической интуиции сочетается с незнанием литературы. Я бы вообще не стал комментировать изложение там вопросов СТО, если бы книга Уиттекера не посеяла во многих умах сомнений в том, кому принадлежит приоритет в создании этой теории. Мнение самого Уиттекера лучше всего иллюстрирует заголовок главы, где рассматривается данная тема: «Теория относительности Пуанкаре и Лоренца»[7]). Борн откровенно высказал Уиттекеру свое мнение [B3]. Эйнштейн отозвался так: «Мне нет нужды читать эту вещь... Если ему удастся убедить других, это их дело» [B2, с. 199].

Лоренц и Пуанкаре. В каждой статье Пуанкаре, посвященной принципу относительности, признается новаторская роль Лоренца. В своих геттингенских лекциях Пуанкаре назвал его одним из «великих ниспровергателей» ньютоновой механики (интересно, согласился бы с ним Лоренц?), и далее он упомянул о «чрезвычайно остроумной» идее местного времени.

Лоренц, в свою очередь, также высоко ценил Пуанкаре. В крупной статье 1904 г. Лоренц отметил, что критика Пуанкаре (высказанная на парижской конференции 1900 г.) по поводу нагромождения слишком большого числа независимых гипотез стимулирующе повлияла на его дальнейшую работу [L6]. Позднее

[7]) Некролог Эйнштейну, написанный Уиттекером для Королевского общества, не отличался особыми достоинствами [W3].

он выразил благодарность Пуанкаре за возможность ознакомиться с «...важной работой, посвященной динамике электрона» [L7]. В т. 38 журнала «Acta Mathematica», полностью посвященном памяти незадолго до того скончавшегося Пуанкаре, Лоренц детально проанализировал палермскую статью [L8], в которой, кстати, впервые введена мнимая временная координата ($x_4 = ict$). Касаясь вклада Пуанкаре в развитие принципа относительности, Лоренц, как всегда, дал корректную оценку. В обоих изданиях колумбийских лекций имя Пуанкаре упоминается лишь в связи с предложенным им поверхностным давлением. В письме Эйнштейну Лоренц вспоминал: «Я ощущал необходимость *более общей* теории, которую пытался разработать позднее [т. е. в 1904 г.] ...Заслуга в разработке такой теории принадлежит Вам (и, в меньшей степени, Пуанкаре)» [L4].

Лоренц и Эйнштейн. Как мне неоднократно говорил Эйнштейн, Лоренц был самой цельной и гармоничной личностью из всех, кого он знал. Эйнштейн относился к Лоренцу со смешанным чувством уважения, любви и восхищения. «Я восхищаюсь этим человеком, как никем другим, я бы даже сказал, что люблю его»,— писал он Лаубу в 1909 г. [E7]. В письме Гроссману он назвал Лоренца «великим коллегой» [E9]. Самому Лоренцу Эйнштейн писал: «Вы, несомненно, чувствуете, какое огромное уважение я испытываю к Вам» [E10]. Во время выступления в Лейденском университете на траурной церемонии, посвященной памяти Лоренца, Эйнштейн сказал: «Огромное значение его работ состоит в том, что они заложили основы ... атомной теории, а также специальной и общей теории относительности. СТО является более детальным изложением концепций, которые содержатся в его трудах 1895 г.» [E11].

Жизнь Лоренца проходила в Арнеме, Лейдене и Гарлеме. Ему было 44 года, когда он принял участие в первой международной физической конференции, проходившей в соседней Бельгии; это была его первая поездка за рубеж. Эйнштейн к такому же возрасту успел пожить в четырех странах и сменить четыре профессорских должности. Он, перелетная птица, возможно, временами тосковал по размеренной и упорядоченной жизни верхушки среднего сословия Голландии, к которому принадлежал Лоренц.

Лоренц, со своей стороны, также очень высоко ценил Эйнштейна. В гл. 12 я более подробно остановлюсь на отношениях этих двух ученых и расскажу о том, как Лоренцу почти удалось уговорить Эйнштейна постоянно обосноваться в Голландии.

Пуанкаре и Эйнштейн. Почему Пуанкаре не упомянул об Эйнштейне в своих геттингенских лекциях? Почему ни в одной статье Пуанкаре не писал о роли Эйнштейна в создании теории относительности? Немыслимо, чтобы Пуанкаре, ознакомившись со статьями Эйнштейна 1905 г., не понял их. Невероятно, чтобы к 1909 г., когда он выступал в Геттингене, он не слышал о том, что сделал в данной области Эйнштейн. Неужели дело в капризности или профессиональной зависти? Я не буду здесь распространяться

по этому поводу, ибо каждый может по-своему истолковать такое поведение. Не исключено, что Пуанкаре только пролистал статьи Эйнштейна и поспешно заключил, что все это ему уже известно и в них нет ничего нового. Такое случалось, и неоднократно. В своей книге «Превратности влияния» Гарольд Блум пишет: «Выдающиеся поэты... тогда оставляют свой след в истории, когда по-своему истолковывают творчество других, тем самым как бы освобождая место для себя...»,— и далее говорит о «...выдающихся поэтах, ярких личностях, которые до конца дней своих упорно противились влиянию великих предшественников» [B4][8]). В этом отношении я не вижу большой разницы между выдающимися поэтами и людьми, занимающимися другой творческой деятельностью. Реакция Пуанкаре на работы Римана [K1], а также отношение Эйнштейна к Гильберту (о чем речь пойдет в гл. 14) могут служить примером справедливости такого тезиса. Во всяком случае, эти вопросы занимательны и правомерны, возникают они при внимательном изучении фактов, но вот ответить на них гораздо труднее, чем их поставить. По моему мнению, то, что Пуанкаре впервые упомянул об Эйнштейне лишь незадолго до своей кончины, гораздо важнее того, что и Эйнштейн упомянул Пуанкаре только в самом конце жизни. Завершая обсуждение отношений этих двух ученых, приведу их высказывания почти без комментариев.

В начале биографии Эйнштейна Александр Мошковский [M2] рассказал о лекции, которую Пуанкаре читал по-немецки (он им неплохо владел) в Физическом обществе Берлина 13 октября 1910 г. Темой лекции была «новая механика». «В ходе этой лекции мы впервые услышали имя Альберта Эйнштейна». Пуанкаре говорил о новом подходе, который, по его признанию, «нарушил гармонию его прежних представлений». К сожалению, неизвестно, что конкретно сказал Пуанкаре об Эйнштейне.

Личная встреча Пуанкаре и Эйнштейна (насколько мне известно, первая и последняя) состоялась на первом Сольвеевском конгрессе, проходившем в Брюсселе в октябре 1911 г. Эйнштейн так отозвался в письме об этой встрече: «Пуанкаре был откровенно настроен против [теории относительности] и, несмотря на свой острый ум, проявил слабое понимание сложившейся ситуации» [E12]. Это еще раз демонстрирует, что либо Пуанкаре так и не понял СТО, либо не хотел признать ее справедливость.

Вскоре администрация Цюрихского политехникума, собираясь предложить Эйнштейну должность профессора, обратилась к Пуанкаре с просьбой высказать свое мнение. Пуанкаре ответил: «Господин Эйнштейн — один из самых оригинальных мыслителей, которых я знал; несмотря на молодость, он уже занимает очень почетное место среди ведущих ученых нашего времени. Особое восхищение вызывает та легкость, с которой он воспринимает по-

[8]) Выражаю благодарность С. Пайс за то, что она привлекла мое внимание к книге Блума.

вые концепции и делает из них все возможные выводы. Он не придерживается классических представлений и, столкнувшись с любой физической проблемой, быстро схватывает ее суть. Это позволяет ему предсказывать новые явления, которые позднее, возможно, удастся проверить экспериментально. Не думаю, что все его гипотезы выдержат проверку опытом, когда такая проверка станет возможной. Так как он одновременно работает по разным направлениям, скорее всего, большинство путей, по которым он идет, заведет в тупик; но следует надеяться, что хотя бы одно из намеченных им направлений окажется верным, и этого будет достаточно» [P6].

Насколько я знаю, это первое и последнее суждение Пуанкаре об Эйнштейне. После того, как Пуанкаре встретился с Эйнштейном и написал свой отзыв о нем, он еще дважды касался теории относительности [P7, P8]. И оба раза он упоминал Лоренца, но не Эйнштейна, хотя и сослался на него во второй лекции в связи с фотоэффектом. Было это 11 апреля 1912 г. Три месяца спустя он скоропостижно скончался.

В 1919 г. математик Миттаг-Леффлер обратился к Эйнштейну с просьбой написать статью для выпуска «Acta Mathematica», посвященного памяти Пуанкаре [M3]. Эйнштейн ответил четыре месяца спустя. Он писал, что получил эту просьбу с большим опозданием и что теперь «...уже наверно слишком поздно» [E14]. Миттаг-Леффлер ответил, что у Эйнштейна еще есть время прислать свою статью, если он того пожелает [M4]. Через два с половиной месяца Эйнштейн сообщил, что занятость и поездки не позволили ему написать такую статью и добавил, что просит расценивать это «...лишь как признак исключительно серьезного отношения к данному поручению» [E14].

В декабре 1920 г. в Берлине, в своем доме на Габерландштрассе, Эйнштейн дал интервью корреспонденту газеты «New York Times». В ответ на вопрос о создании теории относительности Эйнштейн сказал: «Было обнаружено, что [галилеева инвариантность] не выполняется в электродинамике при рассмотрении больших скоростей движения. Это повлекло за собой создание голландским профессором Лоренцем и мной специальной теории относительности...» [E15]. Возможно, при этом справедливо было бы упомянуть и о новаторских идеях Пуанкаре, тем более что в интервью, опубликованном парижской «Figaro» в 1921 г., Эйнштейн очень высоко отозвался о Пуанкаре [E16].

Как-то в начале 50-х годов я спросил Эйнштейна, какое влияние оказала на него палермская работа Пуанкаре. Он ответил, что никогда не читал ее. У меня был экземпляр этой статьи, и я спросил, не хочет ли он с ней ознакомиться, Эйнштейн ответил согласием, и я принес ему эту статью. Обратно я ее так и не получил. Спустя некоторое время после смерти Эйнштейна я попросил Элен Дюкас поискать ее, но оказалось, что она бесследно исчезла...

Может быть, он и прочитал ее. В 1953 г. Эйнштейн получил приглашение принять участие в намечавшихся в Берне торже-

ствах по поводу 50-летия создания теории относительности. Он ответил, что по состоянию здоровья приехать не может. В том же письме Эйнштейн впервые (насколько мне известно) упомянул о роли Пуанкаре в создании СТО: «Я надеюсь, что будут должным образом отмечены заслуги Г. А. Лоренца и А. Пуанкаре» [E17]. Берлинская конференция состоялась вскоре после смерти Эйнштейна. С речью о Лоренце и Пуанкаре выступил Борн (присутствовавший на геттингенских лекциях Пуанкаре). Мне кажется, что он не очень хорошо справился со своей задачей [9]).

За два месяца до кончины Эйнштейн вынес свое окончательное и справедливое суждение: «Еще Лоренц понял, что преобразования, названные его именем, необходимы для анализа уравнений Максвелла, а Пуанкаре углубил это понимание...» [E18].

Кода [10]): опыт Майкельсона — Морли. В заключение рассказа об истории создания СТО возвращаюсь к ее истокам. В конце § 6.1 я обещал подробнее прокомментировать нежелание Эйнштейна признать влияние опыта Майкельсона — Морли на ход своих рассуждений. Этим мы сейчас и займемся.

В письме одному из историков науки, написанном за год до смерти, Эйнштейн так в последний раз высказался по этому поводу: «На мои работы результат Майкельсона не оказал значительного влияния. Я даже не помню, знал ли о нем, когда в 1905 г. писал свою первую работу по СТО. Объясняется это тем, что я из общих соображений был твердо убежден в отсутствии абсолютного движения, и проблема заключалась лишь в том, как примирить такое представление с известными положениями электродинамики. Исходя из этого, можно понять, почему на моих личных усилиях опыт Майкельсона никак не сказался или, во всяком случае, не сыграл решающей роли» [E19].

Откуда такая потребность не помнить или, в лучшем случае, недооценивать влияние этого опыта?

За 20 с небольшим лет до написания этого письма и через без малого 30 лет после создания СТО Эйнштейн выступил в Оксфорде с лекцией «О методе теоретической физики» [E20], в которой он сказал: «Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы». Мне кажется, что здесь Эйнштейн переоценивал возможности человеческого разума, даже такого мощного, как свой. Верно, что если у физика-теоретика нет чувства математической красоты, элегантности и простоты, то это существенный недоста-

---

[9]) «Подход, использованный Пуанкаре, был точно таким же, как и подход, предложенный Эйнштейном в первой статье 1905 г. ... Означает ли это, что Пуанкаре уже все знал до Эйнштейна? Возможно...» [B5].

[10]) Здесь, как и в ряде других мест, автор использует музыкальный термин. *Кода* — дополнительный заключительный раздел музыкального произведения, закрепляющий главную тональность и обобщающий предшествующее музыкальное развитие.— *Примеч. пер.*

ток. Но в то же время опасно, а часто и смерти подобно, полагаться исключительно на формальный подход. Этой опасности не избежал в последние годы жизни и сам Эйнштейн.

Такое отношение к математике было совершенно не характерно для молодого Эйнштейна. Что заставило его так резко изменить взгляды? Несомненно, на его мышление сильно повлиял тот факт, что, когда он безуспешно пытался построить общую теорию относительности, риманова геометрия уже была создана. Однако возможно, что убеждения, высказанные в ходе оксфордской лекции, имеют и более глубокие корни.

Преступая грань истории, беру на себя смелость высказать предположение о том, что убежденность Эйнштейна в возможности находить новые понятия чисто математическим путем может уходить своими корнями в 1905 г. Кинематическая часть его июньской статьи имеет идеальную аксиоматическую структуру законченной теории; эта структура внезапно явилась ему как озарение после беседы с Бессо. Может быть, это впечатление было настолько сильным, что полностью овладело им, а огромное желание приблизиться к божественно прекрасному процессу чистого творчества как бы частично вытеснило более ранние мысли и представления? Все возможно, и ни мне, ни кому-то другому не дано знать, так ли это на самом деле. Помочь нам не смог бы и сам Эйнштейн...

Глава 9. «СЧАСТЛИВЕЙШАЯ МЫСЛЬ В МОЕЙ ЖИЗНИ...»

Musz es sein?
Es musz sein [1])

Опус 135 Бетховена

Номер журнала «Nature» от 17 февраля 1921 г. почти целиком посвящен теории относительности. Он вышел в свет в то время, когда «...два явления, предсказанные общей теорией относительности и не имевшие ранее удовлетворительного объяснения, были подтверждены в результате наблюдений, а третье такое явление находилось в стадии проверки» [L1]. К первым двум упомянутым явлениям относятся прецессия перигелия Меркурия и искривление лучей света при их прохождении вблизи Солнца. Оба эти эффекта были рассчитаны Эйнштейном в 1915 г. Результаты первого расчета очень хорошо согласовывались с давно известными данными наблюдений. Справедливость второго предсказания была подтверждена в 1919 г. Третье явление — «красное смещение» спектра излучения — в 1921 г. было еще предметом исследований.

Этот номер журнала вышел в то время, когда Эйнштейн получил мировую известность не только в кругах физиков, но и среди широкой общественности. Написанная Эйнштейном вступительная статья начинается так: «Есть нечто привлекательное в изложении эволюции идей, максимально кратком ...» [E1]. За вступлением следуют статьи астрономов Дайсона и Кроммелина, физиков Джинса, Лоренца, Лоджа и Эддингтона, а также математика Германа Вейля. В этом же номере неизбежно присутствуют статьи философского характера. На его подготовку ушло много времени. Впервые идея публикации такого тематического номера журнала возникла вскоре после исторического совместного заседания Королевского общества и Королевского астрономического общества, проходившего в Лондоне 6 ноября 1919 г. На этом заседании было доложено о том, что результаты, полученные экспедицией по наблюдению солнечного затмения в мае 1919 г., согласуются с теорией Эйнштейна. Тогда же Эйн-

[1]) «Ужель так должно быть? Да, так и быть должно» (*нем.*).— *Примеч. пер.*

штейн получил приглашение написать статью для журнала «Nature» [L2]. Именно он, стремясь быть «максимально кратким», вызвал задержку публикации. К январю 1920 г. статья была почти готова, «...но столь объемна, что возникли сомнения в возможности ее публикации в „Nature“» [E2]. Опубликовать ее действительно оказалось невозможным. Краткая статья, вышедшая наконец в «Nature» [E1], сильно отличается от первоначальной рукописи, озаглавленной «Развитие основных идей и методов теории относительности». Эта рукопись так никогда и не была опубликована, но сохранилась. Оригинал ее находится в библиотеке Пирпонта Моргана в Нью-Йорке, и в дальнейшем будет называться «моргановской рукописью».

Это исключительно интересный документ. В нем Эйнштейн делится с читателем не только своими мыслями, но и чувствами. Например, он рассказывает, что при подготовке обзорной статьи 1907 г. задумался над тем, каким образом следует видоизменить теорию тяготения Ньютона, чтобы она удовлетворяла СТО: «Когда в 1907 г. я работал над обзорной статьей по СТО для журнала „Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“, я попытался видоизменить теорию тяготения Ньютона так, чтобы ее законы соответствовали [специальной] теории относительности. Попытки такого рода продемонстрировали, что это возможно, но они не удовлетворяли меня, так как строились на физически необоснованных гипотезах». (Более подробно об этих попытках рассказано в гл. 13.)

Далее в рукописи говорится:

> «И тогда мне в голову пришла счастливейшая мысль в моей жизни. Существование гравитационного поля[2]) может считаться лишь относительным, точно так же, как существование электрического поля, наводимого в результате электромагнитной индукции. Это связано с тем, что *для наблюдателя, свободно падающего с крыши, гравитационное поле*, по крайней мере, в его ближайшем окружении, *не существует*. В самом деле, если при этом наблюдатель бросает какие-то предметы, то они находятся по отношению к нему в состоянии покоя или равномерного движения вне зависимости от их химического или физического состава (здесь, естественно, не учитывается сопротивление воздуха). Таким образом, наблюдатель имеет право утверждать, что находится „в покое“.
>
> При таком подходе исключительно интересный экспериментально установленный закон, в соответствии с которым все тела падают с одинаковым ускорением, сразу приобретает глубокий физический смысл. Ясно, что если бы существовал один-единственный предмет, падающий в гра-

[2]) Здесь в оригинале есть несколько слов, которые, совершенно очевидно, Эйнштейн забыл вычеркнуть.

витационном поле не так, как другие тела, то это позволило бы наблюдателю установить, что вокруг него имеется поле тяготения, и он в нем падает. Если же таких предметов не существует (как с большой точностью демонстрирует эксперимент), то в распоряжении наблюдателя нет объективных средств обнаружения своего падения в гравитационном поле. В таком случае он вправе считать, что находится в покое в пространстве, лишенном поля тяготения.

Экспериментально установленная независимость ускорения свободного падения от массы тела является, таким образом, мощным аргументом в пользу того, что постулат относительности может быть распространен на системы отсчета, находящиеся в относительном неравномерном движении».

Перейдем теперь к рассмотрению разд. V обзорной статьи Эйнштейна 1907 г. [E3], поступившей в редакцию 4 декабря. Именно с этой статьи начинается его долгий путь от специальной теории относительности к общей. Последуем же за Эйнштейном по этому пути, полному злоключений, неудач, долгих остановок, и проследим, как в конце концов 25 ноября 1915 г. появилась на свет в современном виде общая теория относительности.

Я уже упоминал в гл. 7 о том, что сделал Эйнштейн в области СТО после написания сентябрьской статьи 1905 г. Некоторые из его работ вышли в 1906 г. и в начале 1907 г. В тот же период было написано и дополнение к статье 1905 г., посвященной броуновскому движению (гл. 5). Однако в основном в то время он занимался квантовой теорией. В 1906 г. Эйнштейн дал свое толкование работы Планка 1900 г., посвященной квантовой теории, и закончил фундаментальную статью, в которой рассматриваются вопросы квантовой теории удельной теплоемкости твердого тела (гл. 19, 20).

Первой крупной работой Эйнштейна по СТО, опубликованной после 1905 г., стала обзорная статья, вышедшая в 1907 г. Она была написана по просьбе редактора журнала «Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik» Й. Штарка. Эйнштейн принял предложение написать обзор 25 сентября 1907 г. [E4]. Чуть позже, 1 ноября, он написал Штарку: «Первая часть статьи для Вашего журнала уже готова. Все свободное время, которого у меня, к сожалению, очень мало, я отдаю написанию второй части» [E5]. Так как во второй части приводится несколько соображений по поводу тяготения, очень вероятно, что «счастливейшая мысль» посетила Эйнштейна в ноябре 1907 г. Когда и при каких обстоятельствах это произошло, известно со всей определенностью из его выступления в Киото: «Я сидел в кресле в бернском патентном бюро, как вдруг мне в голову пришла мысль: „В свободном падении человек не ощущает своего веса!“. Я был поражен. Эта

простая мысль произвела на меня огромное впечатление. Развив ее, я пришел к теории тяготения» [11].

Почему Эйнштейн задумался над проблемой тяготения? Чтобы *включить* тяготение в СТО или *расширить* границы применения СТО? Как мне кажется, процитированные выше строки из моргановской рукописи свидетельствуют о том, что как только он захотел включить в СТО тяготение, он тут же, или почти тут же, понял, что можно расширить и сферу применения своей теории. Об этом, в той же киотской лекции, говорит и сам Эйнштейн: «В 1907 г., работая над обзором по СТО... я понял, что в рамках этой теории можно рассматривать все явления природы, за исключением тяготения. У меня возникло сильное желание понять, почему это так... Меня особо беспокоило то, что хотя [в СТО] так наглядно вводится связь между инерцией и энергией, нет никакой взаимосвязи между инерцией и весом. У меня возникло подозрение, что в рамках СТО такая взаимосвязь недостижима» [11]. Отсутствие в обзоре 1907 г. уравнения для статического ньютонова гравитационного потенциала Φ:

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho \qquad (9.1)$$

(ρ — плотность вещества, G — ньютонова гравитационная постоянная) прямо указывает на то, что Эйнштейн не стремился к обобщению этого уравнения применительно к СТО. Уравнение (9.1) не появляется в его работах до февраля 1912 г. [E6], но к тому времени, как мы увидим в гл. 11, Эйнштейн уже знал, что данное уравнение, вообще говоря, несправедливо даже для статики.

В разд. V обзорной статьи 1907 г. рассматриваются в основном три вопроса.

1. Принцип эквивалентности. «Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?» — с этого вопроса начинает Эйнштейн свои рассуждения. «...Этот вопрос должен возникнуть перед каждым, кто следил за применениями принципа относительности до настоящего времени...» Затем приводится стандартное рассмотрение задачи. Система отсчета Σ_1 движется в направлении x с постоянным ускорением γ. Вторая система отсчета Σ_2 пребывает в покое в однородном гравитационном поле, сообщающем всем телам ускорение $-\gamma$ в направлении x. «...При современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета Σ_1 и Σ_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем *предполагать* полную (курсив мой.— *А. П.*) физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета. Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета». Эйнштейн отметил, что в данном обзоре не место детальному обсуждению возникающих при этом вопросов. Тем не менее, он применил свой новый

постулат к уравнениям Максвелла, но опять-таки для равноускоренного движения. Эйнштейн не рассматривал проблему движения с переменным ускорением до 1912 г., когда он впервые назвал свою гипотезу принципом эквивалентности [Е6, с. 365].

2. Гравитационное красное смещение. Во многих учебниках по теории относительности рассказывается о предложенном Эйнштейном методе расчета красного смещения на примере эффекта Доплера для света, который распространяется сверху вниз в лифте, движущемся вверх с некоторым ускорением. Он действительно дал такой вывод в 1911 г. (см. гл. 11). Однако Эйнштейн знал о красном смещении еще в 1907 г. Данный им тогда вывод обладает меньшей общностью, чем последующий, он более трудоемок и менее нагляден, но при том заслуживает особого внимания, так как в нем заложены две идеи, на которых впоследствии будет построена окончательная теория — существование местных лоренцевых систем отсчета и постоянство скорости света для бесконечно малых световых путей. Применительно к малым скоростям, малым постоянным ускорениям и малым временным интервалам вывод имеет следующий вид.

Рассмотрим две системы отсчета $S(x, y, z, t)$ и $\Sigma(\xi, \eta, \zeta, \tau)$, которые в некий момент времени совпадают друг с другом и имеют одинаковые скорости $v = 0$ (символы в скобках относятся к соответствующим пространственно-временным координатам). В исходный момент времени множество часов системы S синхронизируются друг с другом и с таким же множеством часов системы Σ. Момент времени, в который системы S и Σ совпадают, обозначим $t = \tau = 0$. Система S остается в покое, в то время как система Σ начинает двигаться в направлении x с постоянным ускорением γ. Введем затем третью систему отсчета $S'(x', y', z', t')$, движущуюся относительно S в направлении x с постоянной скоростью v, так что в течение *фиксированного* интервала времени t имеем $x' = \xi$, $y' = \eta$, $z' = \zeta$. Отсюда получаем $v = \gamma t$. Предположим также, что в момент совпадения систем S' и Σ все часы, имеющиеся в S', синхронизированы с часами системы Σ.

I. Рассмотрим теперь системы отсчета S' и Σ через некий интервал времени δ. Этот интервал настолько мал, что всеми эффектами порядка $O(\delta^2)$ можно пренебречь. Как будут идти часы в системе S' по сравнению с системой Σ, если γ так мало, что всеми эффектами порядка $O(\gamma^2)$ можно пренебречь? Легко видеть, что при сделанных предположениях все эффекты, связанные с относительным перемещением, относительной скоростью и ускорением и влияющие на темп хода часов в системах Σ и S', будут второго и более высоких порядков. Таким образом, для бесконечно малого временного интервала δ можно по-прежнему для измерения темпа хода часов в системе Σ использовать часы местной лоренцевой системы отсчета S'. Поэтому «...для определения понятия одновременности можно применять принцип постоянства скорости света, если ограничиться очень малыми световыми путями». Применение трех систем отсчета исключитель-

но изобретательно. С одной стороны, системы S и S' являются инерциальными, и в них можно пользоваться СТО. С другой стороны, в течение малого интервала времени измерения, проводимые в S', могут с точностью до эффектов более высокого порядка отождествляться с измерениями, выполняемыми в системе Σ.

II. Как идут по отношению друг к другу часы, находящиеся в различных точках системы Σ? В момент времени $t = \tau = 0$ двое часов системы Σ были синхронизированы друг с другом и с часами системы S. Две точки системы Σ движутся по отношению к S одинаково, поэтому двое часов системы Σ по отношению к S остаются синхронизированными. Но тогда (как следует из СТО) они более не синхронизированы с системой S' и, таким образом, в соответствии с п. I, не синхронизированы друг с другом. Теперь можно *определить время* τ *для системы* Σ, выделив *одни* часы в системе Σ, скажем те, которые находятся в начале координат, и приравняв τ к t. Затем, исходя из п. I, можно определить одновременность в системе Σ, используя для этого систему S': условие одновременности событий 1 и 2 в Σ задается выражением

$$t_1 - vx_1/c^2 = t_2 - vx_2/c^2, \tag{9.2}$$

где вновь $v = \gamma t = \gamma\tau$. Пусть индекс 1 соответствует началу координат в системе Σ, а индекс 2 — точке пространства $(\xi, 0, 0)$, где показание часов равно σ. Сделаем последнее допущение: время τ, соответствующее совмещению систем S' и Σ, также считается малым, вследствие чего можно пренебречь эффектами порядка $O(\tau^2)$. Тогда $x_2 - x_1 = x_2 - x_1 = \xi$, $t_1 = \tau$, $t_2 = \sigma$, в результате чего уравнение (9.2) приводится к виду

$$\sigma = \tau(1 + \gamma\xi/c^2). \tag{9.3}$$

Эта, хотя и выведенная иначе, формула приводится в современных учебниках.

Как применить принцип эквивалентности к этому уравнению, также хорошо известно. Установлено, что для системы отсчета, покоящейся в однородном гравитационном поле, которое действует в направлении ξ, уравнение (9.3) имеет вид

$$\sigma = \tau(1 + \Phi/c^2), \tag{9.4}$$

где Φ — разница потенциальных энергий тяготения между точкой $(\xi, 0, 0)$ и началом координат. (Здесь и в дальнейшем рассматривается энергия гравитационного поля, отнесенная к единице массы, поэтому Φ имеет размерность скорости в квадрате.)

Эйнштейн сразу же перешел к физике уравнения (9.4): «Существуют „часы", находящиеся в местах с различными гравитационными потенциалами, скорость „хода" которых можно проконтролировать с большой точностью; это — источники света с линейчатым спектром. Из сказанного выше следует, что свет, приходящий от такого источника, расположенного на поверхности

Солнца, обладает длиной волны... большей, чем свет, испускаемый теми же атомами на Земле». *При этом предполагается, что* «...[уравнение (9.4)] *выполняется также в неоднородном гравитационном поле*» (курсив мой.— *А. П.*). Данное предположение сыграло решающую роль в дальнейшей работе Эйнштейна. Он еще вернется к этому вопросу в 1911 г.

3. Уравнения Максвелла; искривление лучей света; гравитационная энергия mc^2. Эйнштейн упорно продвигался вперед. Теперь он рассматривал уравнения Максвелла, применяя тот же подход, что и для красного смещения. Он вновь сравнивал системы S и Σ, используя в качестве «посредника» местную инерциальную систему отсчета S'. Ход рассуждений здесь очевиден, поэтому я опускаю детали и сразу перехожу к рассмотрению результатов.

Во-первых, Эйнштейн обнаружил, что уравнения Максвелла в системе Σ имеют тот же вид, что и в системе S, а скорость света в S задается выражением

$$c(1+\gamma\xi/c^2)=c(1+\Phi/c^2). \qquad (9.5)$$

«Отсюда следует, что световые лучи, распространяющиеся не по оси [ξ], искривляются гравитационным полем». Во-вторых, он рассмотрел закон сохранения энергии в системе Σ и обнаружил «...весьма примечательный результат. Вкладу энергии E [определяемой как энергия в отсутствие гравитационного поля]... соответствует еще дополнительный вклад величиной

$$(E/c^2)\gamma\xi=(E/c^2)\Phi, \qquad (9.6)$$

связанной с местом, где находится E. Следовательно, каждому количеству энергии E в гравитационном поле соответствует потенциальная энергия, по величине равная потенциальной энергии „тяжелой" массы величиной E/c^2. Таким образом... теорема [$E=mc^2$]... выполняется не только для *инертной*, но и для *тяготеющей* массы...»

Как уже упоминалось, эта статья была получена редакцией 4 декабря, а 24 декабря Эйнштейн писал Конраду Габихту: «Сейчас я [вновь] занимаюсь теорией относительности применительно к закону тяготения... Я рассчитываю объяснить, чем вызываются непонятные пока вековые изменения перигелия Меркурия... [но] пока что-то ничего не выходит» [E7].

Я особо дорожу двумя предметами, принадлежавшими Эйнштейну. Один из них — это его последняя трубка. Чашечка ее сделана из глины, а мундштук — из тростника. Эту трубку мне подарила в 1955 г. Элен Дюкас. Второй — гранки приложения II к статье «Обобщенная теория тяготения», опубликованного впервые в 1950 г. в книге «Сущность теории относительности». На первой странице слегка дрожащей рукой написано: «Паули: после прочтения передайте, пожалуйста, Пайсу». В 1950 г., когда вышла в свет эта книга, мне шел четвертый десяток. Я прочитал ее тогда и до сих пор время от времени перечитываю с

большим удовольствием. При этом меня не покидает одна мысль: «До чего же бесстрашно он двигался вперед!».

Такое же чувство вызывает у меня и обзорная статья 1907 г., которую я прочел несколько позднее. Этой работе недостает блеска первой статьи 1905 г. Допущения довольно неуклюжи и смазывают общность выводов. Кстати, Эйнштейн первым указал на это в 1911 г. Вывод об искривлении лучей света качественно справедлив, но количественно неверен, хотя в 1907 г. за этим еще не крылась логическая ошибка. И вновь первым понял это в 1915 г. именно Эйнштейн. Тем не менее, несмотря на все недостатки, я восхищаюсь обзором 1907 г. в не меньшей степени, чем совершенной статьей 1905 г., восхищаюсь, если не ее содержанием, то мужеством автора.

Подход Эйнштейна к понятию одновременности в 1905 г. явился результатом многолетних размышлений, повлекших за собой новое физическое толкование глобальной лоренц-инвариантности. Спустя всего два года он понял, что дальнейшее расширение принципов СТО требует пересмотра применения его излюбленного метода. Еще в 1907 г. он ясно видел, что принцип эквивалентности не сможет претендовать на общую справедливость до тех пор, пока непонятно, как быть с лоренц-инвариантностью. Эйнштейн тогда не знал, что лоренц-инвариантность вновь понадобится, но в новом, локальном варианте. Кто-нибудь другой, возможно, отказался бы от принципа эквивалентности, с тем чтобы сохранить глобальную инвариантность. Кто-нибудь другой, но не Эйнштейн. С редким бесстрашием он начал идти по новому пути. В течение последующих восьми лет у него не было выбора — он должен был идти вперед. С этого момента изменился и его стиль. Если работа 1905 г. напоминает мне произведения Моцарта, то статьи 1907—1915 гг. вызывают в памяти образ Бетховена. Отсюда и эпиграф к этой главе — эпиграф к опусу 135 Бетховена: «Ужель так должно быть? Да, так и быть должно!».

Глава 10. ПРОФЕССОР ЭЙНШТЕЙН

§ 10.1. Из Берна в Цюрих

Эйнштейн начал свою академическую карьеру в декабре 1907 г. Сначала, как было принято, он подал прошение о присвоении ему звания приват-доцента. Приват-доцент не входил в штат факультета, и ни университет, ни какое-либо учреждение не платили ему жалованья. Это звание лишь предоставляло право преподавания в высшем учебном заведении. Каждый слушатель курса вносил небольшую сумму, которая и составляла единственное вознаграждение приват-доцента. Как говорили в те времена, делать академическую карьеру мог только человек состоятельный или женатый на богатой наследнице. Эйнштейн не

принадлежал ни к одной из этих категорий. Возможно, именно поэтому ничего не вышло из его первой попытки получить это звание [E1].

И все же в 1907 г., продолжая работать в патентном бюро, Эйнштейн решил подать прошение — 17 июня он послал кантональным властям Берна копию докторской диссертации, семнадцать опубликованных статей (в том числе, естественно, и все статьи 1905 г.), а также автобиографию. Когда кандидатура Эйнштейна обсуждалась на факультете, несколько человек высказались за то, чтобы дать ему возможность преподавать [1]). Но правила есть правила. По каким-то причинам Эйнштейн не выполнил одного требования: он не приложил к заявлению еще не опубликованную статью. Поэтому удовлетворение его прошения было отложено до того времени, когда он сочтет возможным ее представить [F1, с. 114]. Эйнштейн медлил. В январе 1908 г. он писал Гроссману, спрашивая о том, как лучше всего поступить, чтобы получить место в средней школе: «Может быть, мне поехать туда и продемонстрировать свою достопочтенную персону преподавателя и гражданина? Или я произведу плохое впечатление (семитская внешность, не швейцарец из немецкой части)? Есть ли смысл похвалиться научными статьями?» [E1a]. Не знаю, обращался ли он куда-нибудь и получил отказ или так ничего и не сделал... Но как бы то ни было он, наконец, послал в Берн требуемую правилами работу и 28 февраля получил извещение о том, что прошение удовлетворено и молодому доктору Эйнштейну предоставлено *venia docendi*, право преподавания [F1, с. 123]. Так Эйнштейн стал членом академического сообщества.

Из-за работы в патентном бюро лекции приходилось читать в самые неподходящие часы. В летний семестр 1908 г. он преподавал кинетическую теорию теплоты по субботам и вторникам с семи до восьми утра группе из трех друзей, среди которых был М. Бессо. Второй и последний курс он читал в зимний семестр 1908—1909 гг. Каждую среду вечером, с шести до семи, он читал лекции четырем слушателям. Иногда на лекции заглядывала его сестра Майя. Проучившись два года в Берлинском университете, она теперь училась в Берне. Именно здесь 21 декабря 1908 г. произошло еще одно знаменательное событие в семье Эйнштейнов — Майя с блеском защитила докторскую диссертацию по романской филологии [E2].

Тема второго курса, прочитанного Эйнштейном,— теория излучения — была также темой его неопубликованной работы «Влияние закона распределения энергии в излучении черного тела на состав излучения» [F1, с. 118], представленной для получения звания приват-доцента. Эта работа осталась неопубликованной, рукопись ее также не удалось найти. Вполне вероятно, что она вошла в доклады «К современному состоянию проблемы излучения», опубликованный в начале 1909 г. [E3], и «О развитии

---

[1]) Профессор экспериментальной физики был против [E1a].

наших взглядов на сущность и структуру излучения», напечатанный чуть позже [E4]. Эти работы нельзя назвать просто обзорами. В них содержатся крайне важные новые физические концепции. Спустя 40 лет В. Паули сказал, что второй доклад «...можно считать одной из важных вех в развитии теоретической физики» [P1]. В гл. 21 мы подробно рассмотрим эти две работы. Достаточно напомнить, что они содержат наиболее важные результаты из всего, что было сделано Эйнштейном в 1908—1911 гг.

Первая из этих работ была написана в Берне, вторая — в Цюрихе. Тем временем Эйнштейн получил первую должность на факультете; он стал экстраординарным профессором теоретической физики в Цюрихском университете. Это была вновь созданная должность. После 1867 г., когда из университета ушел Клаузиус, должность профессора теоретической и математической физики ликвидировали [R1]. Предлагая факультету кандидатуру Эйнштейна, Альфред Кляйнер писал: «Сегодня А. Эйнштейн входит в число самых крупных физиков и почти единодушно признан таковым благодаря своим работам о принципе относительности... Ему свойственны необычайная ясность концепций и умение развивать идеи, а также ясность и точность изложения...» [S1, с. 166].

Очевидно, Эйнштейну была известна эта оценка его деятельности. Возможно также, что он догадывался и о других чувствах, которые нашли свое отражение в окончательном докладе факультету [2]): «Впечатления нашего коллеги Кляйнера, основанные на личном знакомстве, были крайне важны как для комитета, так и для факультета в целом, поскольку доктор Эйнштейн является иудеем, и именно лицам этой национальности приписывают (во многих случаях не без основания) неприятные особенности характера, такие как назойливость, наглость и торгашеские наклонности, проявляющиеся в их понимании своего положения в науке. Следует, однако, отметить, что среди иудеев есть и другие люди, которые не обладают, даже в малой степени, этими неприятными чертами, и посему было бы неправильно отказывать кому-либо на том основании, что он является евреем. В действительности встречаются и среди людей, не принадлежащих к этой национальности, ученые, у которых развиваются черты, обычно приписываемые евреям, в частности меркантильное отношение к положению в университете и использование его в корыстных целях. Исходя из этого, и комитет и факультет в целом считают несовместимым со своим достоинством принять антисемитизм в качестве руководства к действию. Что же касается сведений, представленных коллегой Кляйнером о г-не Эйнштейне, то они убедили нас в том, что ему можно предоставить должность профессора» [S2]. Эти строки характеризуют не только Цюрих 1909 г., но и всю европейскую цивилизацию начала XX в.

---

[2]) Впрочем, представляется маловероятным, чтобы Эйнштейн читал этот доклад.

Результат тайного голосования по кандидатуре Эйнштейна, состоявшегося в марте 1909 г., был таков: десять — «за», один воздержался. И вот 6 июля 1909 г. Эйнштейн подал заявление об уходе из патентного бюро. Через два дня — новое свидетельство растущей известности: Женевский университет присвоил Эйнштейну первую в его жизни почетную степень[3]). Эйнштейн вступил в новую должность 15 октября, а 22 октября он, Милева и Ганс Альберт прописались в доме № 12 по Муссонштрассе. В том же месяце новоиспеченный экстраординарный профессор и доктор *honoris causa* впервые в возрасте 30 лет принял участие в работе физической конференции в Зальцбурге. Именно здесь Эйнштейн сделал доклад, так высоко оцененный В. Паули. А 11 декабря 1909 г. он в первый, но далеко не в последний раз произнес речь при вступлении в должность: «О роли атомной теории в новой физике». Заработок его составил 4500 швейцарских франков в год, ровно столько, сколько он получал в должности технического эксперта второго класса в Берне.

У Эйнштейна появились новые обязанности: от шести до восьми часов лекций и семинаров в неделю, студенты, с которыми нужно было заниматься, среди них Ганс Таннер, первый его аспирант, который, однако, не получил ученой степени[4]). В классе Эйнштейн появлялся в несколько потрепанной одежде, в коротких брюках и с клочком бумаги размером с визитную карточку, на которой были набросаны заметки к лекции [S1, с. 171]. Позднее Эйнштейн вспоминал, что преподавание было ему не по душе. «Он [Эйнштейн] явно получал удовольствие от объяснения своих идей другим, и это у него превосходно получалось благодаря особому мышлению, совершенно неформальному и интуитивному. Очевидно, его раздражала необходимость готовить и объяснять материал, который его в данный момент не занимал, так как подготовка к лекциям мешала его собственным мыслям» [S3].

В цюрихский период с октября 1909 г. по март 1911 г. Эйнштейн опубликовал 11 статей по теоретической физике. Он занимался также экспериментами, в бернский период опубликовал работу, в которой содержалась идея конструкции прибора для измерения малых напряжений [E5]. В Берне он пытался экспериментально проверить эту идею в «...маленькой лаборатории для электростатических опытов, которую сам соорудил при помощи самых примитивных средств» [E6]. Друг Эйнштейна по «Академии Олимпия» Конрад Габихт и его брат Пауль заинтересовались этим экспериментом. В лаборатории Цюрихского университета

---

[3]) Почетные степени были присвоены, в числе других, также Марии Кюри и Оствальду.

[4]) Когда Эйнштейн уехал в Прагу, Таннер отправился в Базель, где и получил степень в 1912 г. Другой студент, Герман Шупп, получил тему докторской диссертации от А. Герцога еще до прихода Эйнштейна в Цюрихский университет. Эйнштейн в этом случае выступал в качестве референта, и 21 декабря 1909 г. диссертация была утверждена факультетом.

они собрали «установочку», как любовно называл ее Эйнштейн. В своей работе братья Габихт указывали, что «эксперименты проводились совместно с А. Эйнштейном» [H1]. Эйнштейн с живым интересом следил за дальнейшим развитием событий [E7]. (Более подробно об «установочке» рассказывается в гл. 28.)

В марте 1911 г. семья Эйнштейнов переехала в Прагу. К тому времени она состояла уже из четырех человек: 28 июля 1910 г. у Альберта и Милевы родился второй сын, которого назвали Эдуардом. Дома его звали Теде или Тедель, а обоих сыновей в семье прозвали «медвежатами». От отца Эдуард унаследовал черты лица и музыкальность, от матери — склонность к меланхолии [S1, с. 192]. Позднее Эдуард увлекался искусством; писал стихи. Он хотел стать психиатром и изучал медицину, но цели своей не достиг. Его жизнь закончилась печально[5]).

§ 10.2. Три с половиной года молчания

Впервые Эйнштейн выдвинул принцип эквивалентности в 1907 г. В 1915 г. он изложил общую теорию относительности в ее современном виде. Об этом я узнал давным-давно из статьи Паули, написанной для энциклопедии, где он заметил, что Эйнштейн пришел к окончательному варианту «...после длительных поисков в ложных направлениях» [P2]. Поэтому я представлял себе, что в 1907 г. Эйнштейн полностью погрузился в размышления над новыми идеями и с 1907 г. по 1915 г. неустанно работал над включением в окончательную теорию обобщений, позволяющих перейти от инвариантности при равномерном движении к инвариантности для любых видов движения. Лишь прочитав статьи и в особенности переписку того времени, я понял, насколько заблуждался.

Эйнштейн хранил молчание о тяготении с декабря 1907 по июнь 1911 г.; к тому времени он уже несколько месяцев жил в Праге.

Это молчание можно объяснить разными причинами. Для Эйнштейна это был весьма беспокойный период — родился второй ребенок, он сменил четыре места работы — после патентного бюро и места приват-доцента в Берне стал экстраординарным профессором в Цюрихе и потом штатным профессором в Праге. И физикой он стал заниматься по-другому — в соавторстве сначала с Лаубом, затем с братьями Габихт, а позднее с Людвигом Хопфом. На чтение лекций уходило много времени и сил: «Я *очень* занят преподаванием, поэтому *действительно* свободного времени у меня меньше, чем в Берне» [E8]. Все это могло отвлекать Эйнштейна от размышлений над основной проблемой.

---

[5]) Элен Дюкас рассказывала мне, что Эйнштейн довольно скоро заметил у младшего сына признаки раннего слабоумия. После многих злоключений Эдуард попал в цюрихскую лечебницу, где и умер в 1965 г.

В тот же период возросла его известность, он установил первые контакты с широкими кругами физиков. Обстоятельства такого рода часто снижают творческую активность ученого. Все эти события могли бы помешать кому-то другому начать осуществление новой крупной программы исследований. Но мне кажется, что не это объясняет молчание Эйнштейна.

Ничего не публикуя по проблеме тяготения, он написал много работ по другим вопросам. В те годы он занимался новыми исследованиями — напечатал статьи по СТО совместно с Лаубом, выполнил в соавторстве с Хопфом несколько исследований по классической теории излучения, закончил непростую работу о критической опалесценции. Тогда же Эйнштейн спроектировал свою «установочку». Но прежде всего следует отметить статьи по квантовой физике, о которых уже шла речь выше, статьи, отличавшиеся исключительной новизной. Все это как-то не вяжется с представлением о человеке, сбившимся с пути, не имеющем времени для серьезных размышлений.

В том, что Эйнштейн не опубликовал ничего нового о тяготении в период с 1908 по 1911 г., нет ничего необычного. Видимо, он продолжал размышлять над этой проблемой, но не счел свои идеи достойными публикации. Более любопытно то, что он дважды писал обзоры по теории относительности, но при этом не упомянул ни тяготения, ни принципа эквивалентности с его важными следствиями — красным смещением и искривлением лучей света. Первый обзор был сделан в виде доклада на конференции в Зальцбурге, где речь шла о теории относительности, «...из следствий которой... [было выделено] лишь одно» [E4], а именно соотношение $E = mc^2$, но в основном посвященного квантовой теории. Второй обзор на 44 страницах был опубликован в 1910 г. [E9]. В нем также не упоминается о системах отсчета, движущихся с ускорением, что не так уж удивительно. СТО была еще так молода, что, видимо, Эйнштейну представлялось целесообразным ограничиться разъяснением проблем равномерного относительного движения.

Однако даже этими методическими побуждениями нельзя объяснить одного факта, которому я придаю большое значение. В течение всей жизни Эйнштейн имел обыкновение писать коллегам и друзьям о тех научных проблемах, которые в тот момент находились в центре его внимания. С подкупающей откровенностью он делился с ними не только радостью по поводу удачных находок, но и горечью неудач. Совершенно в духе Эйнштейна было бы написать одному из друзей: я сейчас занят проблемой тяготения, она остается для меня загадкой, и пока с ее решением ничего не выходит. Я просто уверен, что он написал бы что-нибудь в таком роде, если бы в период с 1908 по 1911 г. эта проблема действительно его волновала. Но насколько мне известно, в его научной переписке того времени тяготение и другие, связанные с ним вопросы упоминаются лишь однажды. Его письма ясно показали мне, почему Эйнштейн молчал о принципе

эквивалентности и его следствиях — в то время его занимало не тяготение. Квантовая теория — вот что не давало ему покоя.

Приводимые ниже примеры помогут проиллюстрировать, насколько Эйнштейн был поглощен в то время квантовой физикой. В 1908 г. он писал Лаубу: «Я постоянно занят вопросом о составе излучения... Эта квантовая проблема настолько важна и сложна, что над ней должны думать все. Мне удалось изобрести нечто формально соответствующее [квантовой теории], но у меня есть все основания считать это чепухой» [E10]. Письмо Штарку, июль 1909 г.: «Вы не можете себе представить, сколько усилий мне потребовалось, чтобы придумать удовлетворительный математический подход к квантовой теории» [E11]. Письмо Бессо, ноябрь 1909 г.: «Немного и безуспешно думал о световых квантах» [E8]. Через месяц в письме Бессо Эйнштейн рассказал о попытках изменить уравнения Максвелла таким образом, чтобы новые уравнения позволяли получить световые кванты в виде их решения: «В этом, по-видимому, заключается решение проблемы световых квантов» [E12]. В тот же день он написал Лаубу: «Я еще не нашел решения проблемы световых квантов. Но все равно буду пытаться решить эту задачу, которую так люблю» [E13]. Еще одно письмо Лаубу, март 1910 г.: «Мне удалось найти кое-что интересное о квантах, но пока ничего определенного нет» [E14].

Летом 1910 г. Эйнштейн написал Лаубу о своей пространной обзорной статье [E9]: «[В ней] содержится довольно общее резюме теоретико-познавательных основ теории относительности» [E15]. Это был бы прекрасный случай поразмышлять над новым теоретико-познавательным подходом к принципу эквивалентности, но нет, Эйнштейн поступил иначе. Несколькими строками ниже читаем: «Мне не удалось сколько-нибудь продвинуться в решении проблемы состава света». В ноябре он делится с Лаубом: «Очень надеюсь в ближайшее время решить проблему излучения...» [E16] и неделю спустя: «Опять я зашел в тупик с решением проблемы световых квантов» [E17]. Декабрь, письмо Лаубу: «Загадка излучения по-прежнему не поддается решению» [E18]. К маю 1911 г. он ненадолго отступает: «Я уже больше не задаю вопрос, существуют ли эти кванты на самом деле. Я больше не пытаюсь воссоздать их, так как знаю теперь, что мой мозг не в состоянии постичь проблему с этой стороны» [E19].

Месяцем позже, в июне 1911 г., Эйнштейн вновь возвратился к теории тяготения.

Конечно, нелепо считать, что Эйнштейн вообще не думал над проблемами тяготения в течение трех с половиной лет. Письмо, написанное им Зоммерфельду из Берна незадолго до переезда в Цюрих, показывает, что он размышлял над этой проблемой: «Рассмотрение задачи равномерного вращения твердого тела представляется мне очень важным из-за возможности распространения принципа относительности на равномерно вращающиеся системы на основе того же подхода, который я пытался исполь-

зовать для равноускоренного поступательного движения в последнем разделе... своей статьи [1907]» [E29][6]).

Это отрывочное замечание, как ни важно оно само по себе, не меняет моего мнения о том, что в основном Эйнштейн в то время концентрировал свои усилия на других направлениях. Позднее Эйнштейн неохотно рассказывал о том, что он думал о тяготении в этот период. В гиббсоновской лекции об основах общей теории относительности, прочитанной в Глазго в июне 1933 г., он сказал: «Если бы [принцип эквивалентности] выполнялся для любых явлений, то это указывало бы на то, что принцип относительности должен быть распространен на неравномерно движущиеся системы координат, если стремиться к естественной теории гравитационного поля. Подобные размышления занимали меня с 1908 по 1911 г., и я старался вывести из них конкретные следствия, о которых не предполагал говорить здесь» [E21].

В своем основном научно-автобиографическом очерке 1949 г. [E22] Эйнштейн ничего не рассказал об этих годах. В последних автобиографических записках, законченных за несколько месяцев до смерти, он написал: «С 1909 по 1912 г., когда я преподавал теоретическую физику в университетах Цюриха и Праги, я непрестанно думал над проблемой [тяготения]» [E23]. Это высказывание подтверждается и письмами друзьям, направленными после середины 1911 г., но не раньше того времени. Очевидно, что до переезда в Прагу он считал — и надо добавить, не без оснований — загадки квантовой теории намного более важными, чем проблемы тяготения, а решение их не терпящим отлагательства. С 1911 по 1916 г. ситуация коренным образом изменилась — Эйнштейн в это время написал лишь несколько незначительных статей по квантовой теории, а из переписки ясно видно, что теперь все его внимание поглощено проблемами тяготения. Я не стану утверждать, что усиленные размышления над этой проблемой явились единственной причиной, по которой он не принимал участия в разработке новой квантовой динамики, предложенной Бором в 1913 г. Но этот фактор, несомненно, сыграл немаловажную роль.

А теперь последуем за Эйнштейном в Прагу.

Глава 11. СТАТЬИ, НАПИСАННЫЕ В ПРАГЕ

§ 11.1. Из Цюриха в Прагу

«Вполне вероятно, что я получу предложение из крупного университета занять должность профессора с гораздо большим жалованием, чем получаю теперь. Пока я не имею права ска-

[6]) См. также [S4]. В следующей главе я вернусь к рассмотрению вопроса о том, какое влияние оказала проблема вращательного движения на ход мыслей Эйнштейна.

зать, откуда жду предложения» [E1]. Так писал Эйнштейн матери 4 апреля 1910 г., спустя меньше, чем полгода, после вступления в должность экстраординарного профессора в Цюрихе. Предложение, которое он ждал, должно было прийти из немецкого университета Карла Фердинанда в Праге. Ему приходилось осторожничать, потому что ученый совет, созванный в январе, еще не предложил своих кандидатур факультету. Физик-экспериментатор Антон Лампа, секретарь совета, активно поддерживал кандидатуру Эйнштейна, с которым уже ранее вел предварительные переговоры. В официальном протоколе заседания ученого совета, датируемом 21 апреля 1910 г., сказано, что рассматривались три кандидата, каждый из которых был согласен принять предложение. Первым в списке был Эйнштейн. В протоколе приводится блестящий отзыв Планка: «Работа Эйнштейна по теории относительности, возможно, по дерзости превосходит все, что было сделано до сих пор путем умозрительных построений и с применением теории познания. Неевклидова геометрия рядом с этим — просто детская игрушка». Далее Планк сравнивает Эйнштейна с Коперником [H1].

Новость распространилась. В июле 1910 г. швейцарское министерство просвещения подало петицию правительству кантона Цюрих. В ней говорилось, что по мнению ученых, Эйнштейн — один из редких специалистов по теоретической физике, что студенты политехникума ходят на его лекции в Цюрихский университет, что в неделю вместо обычных четырех — шести у него шесть — восемь часов занятий и что необходимо попытаться оставить его в Цюрихе. Предлагалось повысить его жалованье на тысячу швейцарских франков. Прошение было удовлетворено [P1].

И все же Эйнштейн стремился в Прагу. Летом 1910 г. он писал Лаубу: «Предложения из Праги я не получил. Факультет приглашал меня, но министерство не согласилось из-за моего семитского происхождения» [E2]. (Мне не удалось найти документов, подтверждающих это предложение.) В октябре он написал Лаубу, что вопрос о назначении почти решен [E3], но в декабре сообщил, что из Праги известий все нет [E4]. Наконец, 6 января 1911 г. «Его императорское и апостольское величество» Франц Иосиф официально утвердил назначение Эйнштейна на должность с 1 апреля, о чем тот был извещен письмом от 13 января [H1]. Перед вступлением в должность он должен был заполнить анкету о вероисповедании. Отрицательный ответ не принимался, поэтому Эйнштейн написал «моисеево» [F1, с. 137]. Итак, 10 января он написал заявление об отставке, и 10 февраля она была принята [P2]. В феврале Эйнштейн побывал у Лоренца в Лейдене. В марте он с семьей переехал в Прагу [S1].

Мне не очень ясно, почему Эйнштейн решился на переезд. Цюрих он любил, Милева тоже. У него были коллеги, с которыми можно было обсуждать научные проблемы, и друзья, с которыми он музицировал. Ему повысили жалованье. Не мог он не

знать и о том, что при нормальном ходе событий его ожидает дальнейшее повышение. Нельзя сказать, что Прага была центром теоретической физики. Впрочем, возможно, письмо Кляйнера коллеге указывает на то, что у Эйнштейна могли быть и другие соображения: «После моих заявлений о его поведении (...он хотел извиниться, но я снова пресек эту попытку) Эйнштейн знает, что не может рассчитывать на дружеские отношения с сотрудниками факультета. Я считаю, что вам необходимо подождать, пока он подаст в отставку, прежде чем возвращаться к этому вопросу...» [K1]. Я не знаю, о каком инциденте здесь идет речь.

Вскоре после приезда в Прагу Эйнштейн писал Гроссману: «Тут прекрасный институт, в котором приятно работать» [E5]. Людвиг Хопф, цюрихский ассистент Эйнштейна, последовал за ним в Прагу, но вскоре уехал в Ахен, где получил незначительную должность. То немногое, что я узнал об Эмиле Ноэле, сменившем Хопфа, будет рассказано в гл. 28. Летом 1911 г. к Эйнштейну приезжал Бессо [E6]. В феврале 1912 г. в Праге Эйнштейн впервые встретился с Эренфестом [K2, с. 176]. Отто Штерн, защитив докторскую диссертацию под руководством Сакура в Бреслау, приехал на свои средства к Эйнштейну и работал с ним с 1912 по 1914 г. сначала в Праге, а потом в Цюрихе.

«Я очень доволен и моим положением, и институтом»,— написал Эйнштейн Бессо, но тут же добавил: «Только люди здесь совсем чужие» [E7]. В Праге он так и не прижился. Когда Эйнштейн входил в институт, швейцар ему кланялся и говорил: «Ваш покорный слуга»; такое раболепие было ему не по вкусу.

Бюрократизм его раздражал. «Бесконечное количество бумаг по поводу ничего не значащего дерьма» [E5],— писал он одному из друзей, и «бесконечное бумагомарательство»,— другому [E7a]. Милеве тут тоже было не по себе [F1, с. 169]. В то время в Праге было четыре высших учебных заведения: два университета и два технических института (по одному чешскому и немецкому). Позднее Штерн вспоминал: «Ни в одном [из этих институтов] не было никого, с кем он мог бы поговорить о том, что его действительно интересовало... В Праге он был очень одинок» [J1].

Эйнштейн пробыл в Праге 16 месяцев. Первым, кого он рекомендовал на свое место, был Эренфест. Из этого ничего не вышло, так как Эренфест отказался сделать заявление о своем вероисповедании [K2, с. 178]. В конце концов Эйнштейна сменил Филипп Франк, который оставался в Праге до 1938 г.[1]). В следующей главе я расскажу о возвращении Эйнштейна в Цюрих, но прежде бросим взгляд на то, что было сделано в Праге.

---

[1]) Более подробно о пражском периоде жизни Эйнштейна можно прочитать в книге Ф. Франка [F1, с. 137].

§ 11.2. 1911 г.: можно ли обнаружить искривление лучей света?

> Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не искривляют ли этим своим действием его лучи: не является ли такое действие (caeteris paribus)[2]) сильнейшим на минимальном расстоянии?
>
> *Исаак Ньютон, «Оптика», вопрос 1*

В июне 1911 г. Эйнштейн, наконец, вернулся к проблеме тяготения [E8]. Его перестали удовлетворять результаты, полученные в 1907 г. [E9]. «...Мы теперь еще раз убедились в том, что один из наиболее важных выводов указанной работы поддается экспериментальной проверке». Речь идет об искривлении лучей света. Эйнштейн знал об этом эффекте еще в 1907 г., однако в то время он думал лишь о наземных экспериментах как средстве обнаружения такого эффекта и пришел к выводу, что выполнение этих наблюдений сопряжено со слишком большими трудностями (такой вывод верен и по сей день). Лишь позднее он понял, что можно наблюдать искривление лучей света, проходящих около Солнца. Кроме того, Эйнштейн получил и некоторые новые результаты, о которых хотел сообщить.

В итоге на свет появилась статья, озаглавленная «О влиянии силы тяжести на распространение света» и включенная позднее в сборник «Принцип относительности», который был опубликован впервые в 1913 г. (перевод на английский [L1]). В более поздних изданиях этого маленького удобного для пользования томика имеются работы по теории относительности, написанные Лоренцем, Минковским, Эйнштейном и Вейлем. У сборника есть два недостатка. Во-первых, в нем нет ни одной работы Пуанкаре. Правда, статья Пуанкаре 1905 г. довольно объемна и не очень подходит для небольшого сборника, но в него вполне можно было бы поместить отрывок из этой работы, тем более, что одна из статей Лоренца напечатана там в сокращенном виде. Вторым недостатком следует считать то, что в книге нет разд. V статьи Эйнштейна 1907 г. [E9]. Следовало либо напечатать данный раздел вместе с его статьей 1911 г., либо вовсе не печатать ни одну из работ, так как наиболее тонкие моменты статьи 1911 г. нельзя понять, не будучи знакомым с приближениями, использованными Эйнштейном в статье 1907 г.

В работе 1911 г. Эйнштейн предупреждает читателя: «Выведенные в настоящей работе соотношения, даже если теоретическое основание их и соответствует действительности, являются верными только в первом приближении»,— но при этом ясно не указывает сути данных приближений. Ему еще предстояло научиться в последующих публикациях излагать основные выводы предыдущих.

---

[2]) При прочих равных условиях (*лат*).— *Примеч. пер.*

В этом нет ничего удивительного. До того как Эйнштейн занялся тяготением, каждая из его статей была совершенно ясной и законченной (за исключением, может быть, его ранних работ по основам статистической механики), хотя не всегда это было очевидно. Мы неоднократно отмечали, что Эйнштейн не слишком утруждал себя просмотром литературы, но это не мешало ясности изложения. Естественно, время от времени он возвращался к старым темам, но всякая новая работа была совершенно независимой от других и законченной. Иногда ему приходилось долго и напряженно думать, как в случае СТО, прежде чем удавалось найти новый подход к проблеме. Но в самих статьях нет и следа этих мучительных размышлений, скорее кажется, что автор наслаждается процессом творчества. С 1907 по 1916 г. эта легкость и законченность пропадают. Меняется и стиль — статьи, написанные с характерной для него категоричностью, сменяются отчетами о выполняемой работе.

Переходя к рассмотрению первой из написанных в Праге статей, я, естественно, начну с изложения тех приближений, о которых упоминал Эйнштейн. Главная его задача заключалась в том, чтобы придать смысл понятию одновременности для равноускоренных систем отсчета. С этой целью он еще раз применил методы, использованные им в 1907 г. В статье 1911 г. вновь появляются три системы отсчета S, Σ и S', о которых шла речь в гл. 9[3]). Напомним, что система Σ находится по отношению к системе S в состоянии равноускоренного движения и что инерциальная система отсчета S' лишь в один-единственный момент времени совмещена с системой Σ. Как отмечалось ранее, идея заключалась в том, чтобы связать часы системы S' с часами системы S путем преобразований Лоренца, а затем в бесконечно малый отрезок времени идентифицировать показания часов в системе S' с показаниями часов в системе Σ. В гл. 9 уже показано, что это не строгая процедура. Перечисленные выше приближения справедливы также и для обсуждаемой сейчас статьи.

В статье 1911 г. рассмотрены те же основные вопросы, что и в работе 1907 г.,— принцип эквивалентности, «тяжесть энергии», красное смещение и искривление лучей света. Основные уравнения в этих двух статьях также одинаковы. Однако по каждому из четырех основных вопросов у Эйнштейна появились новые соображения.

Принцип эквивалентности. Пусть система S покоится и пусть в ней действует однородное гравитационное поле в отрицательном направлении оси z. В системе Σ гравитационного поля нет, но она движется с постоянным ускорением относительно системы S в положительном направлении оси z. Сначала Эйнштейн

---

[3]) В статье 1911 г. Эйнштейн системы S, Σ и S' обозначал K, K' и K_0 соответственно. Для простоты я продолжаю пользоваться предыдущими обозначениями.

напоминает об эквивалентности законов механики Ньютона в обеих системах отсчета. Затем он перефразирует этот принцип следующим образом: «...нельзя говорить об *абсолютном ускорении* (курсив мой.— *А. П.*) координатной системы, так же как нельзя в обычной теории относительности говорить об *абсолютной скорости* системы». Отсюда он делает вывод: «С этой точки зрения одинаковое ускорение всех падающих тел в гравитационном поле *очевидно*» (курсив мой.— *А. П.*).

Такой с виду невинный поворот проблемы типичен для Эйнштейна. Он обладал даром находить новизну в старых истинах, посмотрев на них с обратной стороны. В данном случае, вместо того чтобы идти обычным путем (экспериментально известный факт одинаковости времен падения → бессмысленность постоянства абсолютного ускорения), Эйнштейн заменил логику подхода обратной. Итак, уже в 1911 г. можно различить первые признаки новой программы: вывод принципа эквивалентности из новой теории тяготения. Этого нельзя добиться в рамках того, что Эйнштейн назвал обычной, т. е. специальной, теорией относительности. Поэтому следует пытаться создать новую теорию не только тяготения, но и относительности. В указанной статье есть еще одно замечание, относящееся к новой программе: «Конечно, нельзя *любое* поле тяжести заменить состоянием движения системы без гравитационного поля, точно так же, как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования». Это замечание остается справедливым и в окончательном варианте ОТО.

В заключение Эйнштейн еще раз подчеркнул огромное эвристическое значение принципа эквивалентности, справедливого не только для механики точки, но и для всех физических явлений.

Тяжесть энергии; красное смещение. В 1907 г. Эйнштейн указал на то, что электромагнитное поле является источником не только инерциальной энергии, но и такого же количества гравитационной энергии (гл. 9). Он пришел к этому выводу, исследуя структуру уравнений Максвелла в системе Σ. Теперь он был готов развить эти представления, но не вдаваясь в такие подробности, как, скажем, электромагнитное происхождение этого вида энергии. Новый и более общий подход Эйнштейна базировался на широком рассмотрении законов сохранения. Представим себе, говорит он, что энергия какого-то тела увеличилась на величину E. На СТО следует, что его инертная масса соответственно увеличивается на E/c^2. Это приводит к «...удовлетворительному выводу» о том, что закон сохранения массы содержится в законе сохранения энергии. Предположим теперь, продолжает рассуждать Эйнштейн, что соответствующего увеличения гравитационной массы тела нет. Тогда существовал бы отдельный закон сохранения гравитационной массы, но при этом не было бы закона сохранения инертной массы. «Такой вывод нужно считать весьма маловероятным». На неполноту СТО указывает не только сам принцип эквивалентности, но и гравитационные свойства

энергии: «...обычная теория относительности [сама по себе] не дает ни одного аргумента, из которого можно было бы заключить, что вес тела зависит от содержащейся в нем энергии». Однако такую зависимость от энергии можно вывести из довольно общих соображений, если дополнительно использовать принцип эквивалентности. «Покажем, что из нашей гипотезы об эквивалентности систем [S и Σ] тяжесть энергии вытекает как необходимое следствие». Далее Эйнштейн рассуждает следующим образом. (Читатель может освежить в памяти то, что говорилось раньше о системах отсчета, обратившись к гл. 9.)

Пусть в начале координат системы Σ находится приемник света S_1, а на расстоянии h в положительном направлении оси z в той же системе Σ расположен источник света. Источник S_2 испускает излучение энергией E_2 как раз в тот момент, когда система S' совмещена с системой Σ. Излучение поступает к приемнику S_1 через интервал времени, примерно равный h/c. В этот момент приемник S_1 имеет по отношению к системе S' скорость, равную $\gamma h/c$, где γ — ускорение системы Σ. Напомним, что о показаниях часов в системе Σ мы судим при помощи инерциальной системы отсчета S'. Поэтому Эйнштейн был вправе использовать результат, полученный им в статье 1905 г. [E10]: энергия E_1, попадающая в приемник S_1, больше энергии E_2:

$$E_1 = E_2(1 + v/c) = E_2(1 + \gamma h/c^2). \qquad (11.1)$$

Теперь рассмотрим систему S, в которой имеется гравитационное поле. Разместим в этой системе приемник и источник света (S_1 и S_2) в том же положении относительно друг друга, что и в системе Σ. Тогда из уравнения (11.1) и из принципа эквивалентности получим

$$E_1 = E_2 + (E_2/c^2)(\varphi_2 - \varphi_1), \qquad (11.2)$$

где φ_1 и φ_2 — гравитационные потенциалы в положениях 1 и 2. Это закон сохранения энергии для процесса распространения излучения. Из него следует, что энергии E соответствует гравитационная масса E/c^2, что и следовало доказать.

Далее Эйнштейн аналогичным образом подходит к красному смещению. Рассмотрим сначала систему Σ. Пусть свет, испускаемый источником S_2, имеет частоту ν_2. По истечении промежутка времени, примерно равного h/c, приемник S_1 принимает свет с частотой ν_1. Для определения связи между ν_2 и ν_1 прибегаем к помощи системы S'. Тогда хорошо известная формула Доплера дает

$$\nu_1 = \nu_2(1 + \gamma h/c^2). \qquad (11.3)$$

Используя принцип эквивалентности, для системы S получаем

$$\nu_1 = \nu_2(1 + \varphi/c^2), \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \qquad (11.4)$$

Предположим, что это уравнение справедливо также для неоднородных полей. Пусть в положении 2 находится Солнце, а в положении 1 — Земля; значение φ в таком случае отрицательно. Наблюдаемое на Земле красное смещение должно тогда приводить к соотношению $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-6}$.

Здесь я хотел бы прервать обсуждение пражской статьи для того, чтобы высказать два соображения. Первое: сначала Эйнштейн выводит уравнение (11.2) для изменения энергии; затем он «начинает все сначала» и выводит уравнение для изменения частоты [см. (11.4)]. Я уверен, что это не случайно. По моему убеждению, Эйнштейн *намеренно* не вывел лишь одно из них и не получил затем второе при помощи соотношения

$$E = h\nu. \tag{11.5}$$

Эйнштейн не мог забыть о нем, ведь он имел к нему некоторое отношение, и потом, о квантовой теории он вообще никогда не забывал. Однако отныне и навсегда Эйнштейн, когда мог, старался всячески избегать квантовой теории, как и в данном случае, применительно к изменению энергии и частоты. В гл. 26 я вернусь к этой его позиции. Понять ее — значит понять его как ученого.

Второе: в хороших учебниках по ОТО формула для красного смещения выводится дважды. Вначале отмечается, что красное смещение следует из СТО и принципа эквивалентности. Затем, после того как выведены тензорные уравнения ОТО и показано, что принцип эквивалентности строго выполняется лишь для малых интервалов времени и малых расстояний, вновь рассматривается красное смещение и доказывается, что для получения соответствующей формулы достаточно учесть лишь основные отклонения g_{44} от значения, соответствующего плоскому пространству-времени. Если учебник достаточно современен, то дальше излагаются тонкости эффектов второго порядка вплоть до предельных случаев, когда ряды расходятся. Обо всем этом следует помнить, чтобы представить себе трудность задачи, которая стояла перед Эйнштейном в 1911 г. Он знал, что СТО должна быть включена в более общую теорию, но еще не представлял, как это сделать. Он очень аккуратно манипулировал со своими тремя системами отсчета, чтобы получить уравнения (11.1)—(11.4). Он прекрасно осознавал, что эти уравнения есть приближения, но не знал к чему.

Искривление лучей света. Что и как можно измерять? Этот один из основных вопросов науки имеет двоякий смысл. Прежде всего он обозначает: что представляет интерес с концептуальной точки зрения и что возможно технически? Если ставить вопрос так, то высказанные Эйнштейном соображения по поводу красного смещения и отклонения света определили феноменологический подход к ОТО еще до создания этой теории. Но этот вопрос имеет и другой смысл: что такое в принципе имеющее смысл измерение? Пересмотром понятия одновременности в 1905 г.

Эйнштейн помог ответить и на этот вопрос. В 1907 г. в ходе исследования уравнений Максвелла применительно к ускоренным системам отсчета он понял, что при наличии гравитационного поля скорость света перестает быть универсальной константой. При повторном рассмотрении этой проблемы в 1911 г. он вновь оставил в стороне эти ранние динамические соображения. Вместо этого он перешел к толкованию уравнения (11.4).

«При поверхностном рассмотрении может показаться, что [эти уравнения] бессмысленны. Возможно ли, чтобы при непрерывном испускании света из S_2 он прибывал в S_1 с другой частотой, чем свет, вышедший из S_2? Однако ответ на этот вопрос прост». Очевидная трудность заключается не в числе колебаний, а в единице времени — в секунде: следует очень тщательно разобраться в том, что следует понимать под темпом хода часов в неоднородном гравитационном поле. Для этого нужно усвоить следующие три факта, касающиеся времени.

Фабрика часов. Сначала следует собрать, пользуясь словами Эйнштейна: «одинаково идущие часы». Он не говорит, как это сделать. Однако его последующая аргументация имеет смысл только в том случае, если использовать излагаемую ниже процедуру. В некоторой (достаточно малой) части пространства, где гравитационное поле постоянно, построим фабрику по производству часов. Синхронизируем часы обычным способом, после чего перенесем одни из них (U_1) в положение 1, другие (U_2) — в положение 2 и т. д.

Местные наблюдения. Будем измерять частоту спектральной линии, излученной источником света в положении 1, при помощи часов U_1. Обозначим эту частоту $\nu(1,1)$ (излучатель находится в положении 1, измерение часами U_1). Затем определим $\nu(2,2)$ — частоту той же[4]) спектральной линии, излученной в положении 2 и измеренной часами U_2. Можно видеть, как утверждает Эйнштейн, что $\nu(1,1)=\nu(2,2)$, «частота не зависит от того, где установлен источник света вместе с часами».

Это утверждение не вполне строго: хотя до сих пор нельзя рассчитать смещение спектральных линий, вызываемое влиянием локальных внешних гравитационных полей (квантовая теория тяготения пока не создана!), известно, что такое смещение должно иметь место; в рассматриваемом случае оно будет малым.

Глобальные наблюдения. Определим теперь $\nu(2,1)$ — частоту той же спектральной линии, излученной в положении 2, но измеренной в положении 1 при помощи часов U_1. Как следует из уравнения (11.4), $\nu(2,1)\neq\nu(1,1)$. Тем не менее, настаивает Эйнштейн, следует по-прежнему считать физический критерий числа гребней волн, перемещающихся между положениями 1 и 2, не зависящим от абсолютного значения времени. Это вполне возможно, так как «у нас нет никаких оснований допускать, что часы, находящиеся в точках с различными гравитационны-

[4]) Надеюсь, что слова *той же* не вызовут путаницы.

ми потенциалами, должны рассматриваться как одинаково идущие». (Вспомним, что синхронизированы они были на фабрике.)

Это приводит к неизбежному выводу: из требования совместимости уравнения (11.4) с указанным физическим критерием следует, что часы U_2, находящиеся в положении 2, идут в $1+\varphi/c^2$ раз медленнее часов U_1, расположенных в точке 1. Такой вывод, естественно, не противоречит выражению $\nu(2,2)=\nu(1,1)$, так как спектральная частота в положении 2 также уменьшается в такое же число раз, ведь по сути дела спектральная линия есть не что иное как часы. Другими словами, в результате переноса часов в точку с иной напряженностью гравитационного поля они начинают идти по-другому. Это приводит к «следствию... фундаментального значения»:

$$c_1 = c_2(1+\varphi/c^2), \qquad (11.6)$$

где c_1 и c_2 — локальные скорости света в положениях 1 и 2; предполагается, что различие между c_1 и c_2 мало, поэтому символ c в уравнении (11.6) может означать либо c_1, либо c_2. Итак, Эйнштейну вновь удалось поставить все на свои места, но какой ценой! «По этой теории, принцип постоянства скорости света справедлив не в той формулировке, в какой он кладется в основу обычной теории относительности».

Окончательным результатом статьи является применение уравнения (11.6) к расчету отклонения луча света, идущего из «бесконечности» через гравитационное поле точечного источника (с потенциалом $1/r$). Применив принцип Гюйгенса, Эйнштейн обнаружил, что луч света, уходя «на бесконечность», испытывает отклонение в сторону источника поля (в радианах):

$$\alpha = 2GM/\Delta c^2, \qquad (11.7)$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса источника поля, Δ — расстояние максимального сближения, c — скорость света (в вакууме). Для луча света, проходящего около Солнца, $\Delta \approx 7\cdot 10^{10}$ см, $M \approx 2\cdot 10^{33}$ г и $\alpha = 0{,}87''$ (Эйнштейн получил значение $0{,}83''$). Через четыре года он добавил к этому результату множитель 2.

Статья заканчивается призывом к астрономам: «Было бы крайне желательно, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или фантастическими».

С этого момента Эйнштейн постоянно стал писать друзьям о своих надеждах и опасениях, связанных с тяготением, точно так же, как раньше он писал о квантовой теории. Вскоре после окончания обсуждавшейся выше работы он обращается к Лаубу: «Релятивистский подход к проблеме тяготения вызывает серьезные трудности. Мне кажется вероятным, что принцип постоянства скорости света в его обычном виде справедлив лишь для

участков пространства с постоянным гравитационным потенциалом» [E11].

Очевидно, Эйнштейн еще не совсем четко представлял себе, как следует относиться к своей последней работе. Однако он был убежден в том, что нужны новые идеи. Несколько месяцев спустя он пишет своему другу Генриху Цангеру, директору Института судебной медицины при Цюрихском университете: «Как раз сейчас я преподаю основы бедной почившей механики; до чего же она прекрасна... Как-то будет выглядеть ее преемник? Этот вопрос терзает меня непрестанно» [E12].

В заключение я хотел бы воздать должное немецкому геодезисту и астроному Иохапну Георгу фон Зольднеру, который первым в 1801 г. ответил на вопрос Ньютона, вынесенный в эпиграф к этому параграфу [S3]. «Надеюсь, не вызовет возражений то, что я рассматриваю луч света как массивное тело... Нельзя вообразить себе нечто существующее и воздействующее на наши органы чувств, но в то же время не имеющие свойств материи»,— писал Зольднер[5]). Им двигало желание внести возможные поправки в данные астрономических наблюдений. В основу своих расчетов он положил ньютонову теорию истечения, согласно которой свет состоит из частиц. При таком подходе расчет рассеяния света, проходящего около Солнца, сводится к задаче на ньютоновой теории рассеяния. Для световых частиц малой массы результат столь же мало зависит от данной массы, сколь мало результат расчета по волновым формулам Эйнштейна зависит от частоты света. Зольднер проделал соответствующие вычисления и получил результат: $\alpha = 0{,}84''$!!!

В 1911 г. Эйнштейн не знал о работе Зольднера. Она была практически не известна широкому кругу физиков до 1921 г. В том тревожном году Ленард, в очередной раз пытаясь дискредитировать Эйнштейна, воспроизвел отрывок из статьи Зольднера в журнале «Annalen der Physik» [L2]; этому отрывку он предпослал многословное введение, в котором настаивал на приоритете Газенорля в вопросе об эквивалентности массы и энергии (см. § 7.2). Вскоре после этого Ленард получил от Лауэ по заслугам [L3].

§ 11.3. 1912 г.: Эйнштейн на ничьей земле

Прошло еще восемь месяцев, прежде чем Эйнштейн сделал следующий шаг на пути к теории тяготения. В течение этого времени он принял участие в научной конференции, проходившей в Карлсруэ, летом читал курс в Цюрихе и написал несколько статей. Но в основном он опять был занят квантовой теорией. Однако занимался он ей не по своему выбору, а потому что пообещал подготовить крупный доклад по квантовой

[5]) Я видел не оригинальную работу, а недавно опубликованный английский перевод, где также приведены полезные исторические данные [J2].

физике к предстоящему первому Сольвеевскому конгрессу, который проходил с 30 октября по 3 ноября 1911 г. «Мне не дает покоя та чушь, которую я готовлю к Брюссельскому конгрессу»,— писал он Бессо [E13]. Ему совсем не улыбалось принять участие в этом «шабаше ведьм» [E14].

Однако конгресс показался Эйнштейну интересным, и в особенности он восхищался тем, как Лоренц председательствовал на заседаниях. «Лоренц — это чудо разума и такта, живое произведение искусства! По-моему, из всех присутствовавших теоретиков он обладал наиболее мощным интеллектом» [E12]. Результат дискуссий произвел на Эйнштейна меньшее впечатление: «...никто ничего не понимает. Все это мероприятие доставило бы массу удовольствия отцам-иезуитам» [E12]. «В целом конгресс оставил у меня впечатление скорбных стенаний у руин Иерусалима» [E15]. Очевидно, он имел в виду трудность восприятия квантовой физики учеными, привыкшими к классическому мышлению. С заключительной речью на конгрессе выступил Эйнштейн. Предполагалось, что темой его выступления будет квантовая теория удельной теплоемкости. По сути же он критически рассмотрел все известные к тому времени проблемы квантовой теории, проблемы того времени, когда никто еще не подозревал о грозных предзнаменованиях и надеждах, связанных с атомом водорода. Я вернусь к этому вопросу в гл. 20. Что же касается выступления Эйнштейна, то его можно назвать как угодно, но только не чушью.

Вскоре после этого Эйнштейн публикует одну за другой две работы о тяготении, первую — в феврале 1912 г. [E16], а вторую — в марте того же года [E17] (в этом параграфе я буду называть их соответственно работа I и работа II). Обе они служат прекрасным образцом теоретического анализа, хотя для того, чтобы понять их логику, требуется некоторое время. Чтение этих статей 1912 г. оставляет впечатление незавершенности, они похожи, скорее, на довольно пространные черновые наброски, в них чувствуется нерешительность. Причины тому очевидны. В 1907 и 1911 гг. Эйнштейн до конца исчерпал кинематический подход к тяготению. Теперь он занялся одной из сложнейших проблем нашего столетия — поиском новой динамики тяготения, вот почему первые шаги он делал с такой осторожностью.

Указанные статьи были последними, в которых время рассматривалось искривленным, а пространство — плоским. Но уже тогда, впервые в публикациях Эйнштейна, в работе I появилось замечание о таком подходе к пространству: «Эти правила не являются само собой разумеющимися; они содержат в себе некоторые физические предположения, которые иногда могут оказаться и неправильными. Так, например, весьма вероятно, что [законы евклидовой геометрии] несправедливы в равномерно вращающейся системе, в которой вследствие лоренцева сокращения отношение длины окружности к диаметру при применении нашего определения длины должно отличаться от π».

Тем не менее, Эйнштейн пока не отказывается от плоского пространства. И, видимо, не случайно сразу же после только что процитированного отрывка он пишет: «Масштабы, равно как и оси координат, следует представлять себе в виде абсолютно твердых стержней. Это можно делать несмотря на то, что, согласно теории относительности, абсолютно твердые тела в действительности не могут существовать». Последовательность, в которой сделаны эти замечания, заставляет предположить, что знаменитая проблема твердого тела в СТО стимулировала переход Эйнштейна в том же году к искривленному пространству [6]).

Не стоит подробно останавливаться на этих двух статьях, но неправильно было бы и полностью их игнорировать. Да, излагаемой там конкретной динамической модели тяготения была суждена недолгая жизнь, но в целом эти работы не были пустой забавой. Эйнштейн сделал ряд весьма интересных замечаний и открытий, сохранивших свое значение. На них я и остановлюсь сейчас, перечислив в них A — E. Однако в ходе дальнейшего обсуждения технические детали будут сведены к минимуму.

Прежде всего Эйнштейн напоминает читателю о полученном ранее результате, в соответствии с которым скорость света при наличии гравитационного поля не является, вообще говоря, постоянной:

A. «...Этот результат исключает всеобщую применимость преобразований Лоренца».

Тем самым Эйнштейн открывает новую тему. Если ранее он говорил (я перефразирую): «Посмотрим, как далеко можно продвинуться, используя преобразования Лоренца», то теперь он заявляет: «Преобразований Лоренца недостаточно».

Б. «Если... не ограничиваться [пространственными] областями, где c постоянна, то множество эквивалентных систем, равно как и множество преобразований, оставляющих законы природы неизменными, станет более обширным; однако законы при этом станут более сложными». [!!]

Рассмотрим теперь первый динамический подход Эйнштейна к теории тяготения, вытекающий из уравнения (11.6). Он опять начинает с сопоставления однородного поля, имеющегося в системе $S(x, y, z, t)$, с ускоренной системой отсчета $\Sigma(\xi, \eta, \zeta, \tau)$ [7]). Для малых τ он обнаруживает [членами порядка $O(\tau^3)$ можно пренебречь]

$$x = \xi + (ac/2)\tau^2, \quad y = \eta, \quad z = \zeta, \quad t = c\tau \tag{11.8}$$

и выводит важное соотношение

$$c = c_0 + a\xi, \tag{11.9}$$

где c_0 фиксируется темпом хода часов в начале координат си-

[6]) Эта точка зрения более подробно развивается в [S4].

[7]) Здесь вновь используются обозначения, принятые в гл. 9, не совпадающие с обозначениями работы I. В системе S скорость света принимается равной единице.

стемы Σ (ac_0 — ускорение начала координат этой системы по отношению к системе S). Итак, в системе Σ справедливо соотношение $\Delta c = 0$. Из требования эквивалентности следует, что $\Delta c = 0$ и в системе S (символами Δ обозначены соответствующие лапласианы). «Отсюда напрашивается предположение, что это уравнение $\Delta c = 0$ справедливо и в случае любого статического гравитационного поля в отсутствие масс». Следующее *предположение* касается изменения вида этого уравнения в присутствии вещества с плотностью ρ:

$$\Delta c = kc\rho, \tag{11.10}$$

где k — константа. Источник должен быть статическим: «Найденные мной уравнения относятся к статическому случаю, когда массы находятся в покое» [E18].

Это последнее замечание, относящееся к уравнению гравитационного поля, не мешает исследовать движение материальной точки под действием внешнего статического поля c. Эйнштейн обнаруживает, что такое движение описывается уравнением вида

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\dot{\mathbf{x}}}{c}\Big/\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\right) = \nabla c\Big/\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \tag{11.11}$$

где $v^2 = \dot{\mathbf{x}}^2$. При последующем изложении важно помнить, в каком смысле это уравнение удовлетворяет принципу эквивалентности: если c задается уравнением (11.9), то уравнение (11.11) может быть преобразовано к виду, соответствующему отсутствию сил в ускоренной системе Σ.

В работе I (в дополнении) Эйнштейн выводит уравнение (11.11) методом, который мы здесь не будем рассматривать. Но нельзя обойти молчанием комментарий к уравнению (11.11), содержащийся в примечании к работе II. Там Эйнштейн показывает, что это уравнение может быть выведено из вариационного принципа:

$$\delta \int ds = 0, \tag{11.12}$$

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \tag{11.13}$$

Ранее Планк применил уравнение (11.12) к механике точки с использованием СТО [P3], где, естественно, c в уравнении (11.13) — обычная постоянная скорость света в вакууме. На Эйнштейна сильно подействовал тот факт, что уравнения (11.12) и (11.13) по-прежнему справедливы, если c — статическое поле!

В. «В этом случае также оказывается, как это было показано Планком для обычной теории относительности, что значение уравнений аналитической механики выходит далеко за пределы механики Ньютона».

Нет сомнений в том, что именно эта догадка позволила Эйнштейну вывести уравнения механики общей теории относительности в их окончательном виде; при этом уравнение (11.12)

остается неизменным, а уравнение (11.13) подвергается дальнейшему обобщению.

Работа II в основном посвящена вопросу о том, как на уравнения электромагнитного поля влияет гипотеза, в соответствии с которой c есть поле, удовлетворяющее уравнению (11.6). Детали не представляют большого интереса, за исключением одного замечания. Поле c, естественно, входит в уравнения Максвелла, поэтому существует связь между гравитационным и электромагнитным полями. Однако последнее не является, вообще говоря, статическим, в то время как гравитационное поле — статическое по определению. Поэтому уравнения «могут оказаться неточными... так как электромагнитное поле может так изменять гравитационное поле, что последнее перестанет быть статическим».

Не исключено, что кое у кого из читателей при размышлении над последним заявлением возникнет тот же вопрос, который возник у меня, когда я впервые прочитал работу II. Что это нашло на Эйнштейна? Как он вообще мог писать о статическом гравитационном поле, связанном с нестатическим максвелловским полем, и надеяться на то, что это может иметь какой-то смысл? Я бы обязательно задал ему такой вопрос, если бы прочитал эти статьи ко времени наших с ним бесед, а не много лет спустя. Поэтому мне ничего не остается, кроме как сочинить этот ответ, который, как мне кажется, он мог бы дать.

Дело происходит году в пятидесятом. Эйнштейн мог бы сказать так:

> «Видите ли, та пражская пора для меня как физика была самым бестолковым периодом. Прежде чем записать свое уравнение $\Delta c = kc\rho$, я, конечно, подумывал о том, чтобы вместо лапласиана применить даламбертиан. Тогда все выглядело бы несколько элегантней. Но я, тем не менее, отказался от этой мысли, поскольку уже тогда знал, что тяготение выведет меня за рамки преобразований Лоренца. Я не видел смысла в том, чтобы писать $\Box c = kc\rho$, так как лоренц-инвариантность не была для меня более очевидным критерием, в особенности при рассмотрении динамики тяготения. По той же причине я никогда не верил в то, чем занимались тогда Абрагам и другие. Бедняга Абрагам... Следует сознаться, я тогда не понимал, что можно получить уравнение для не зависящего от времени скалярного гравитационного поля, которое удовлетворяло бы слабому принципу эквивалентности. Нет-нет, это не имеет ничего общего с неверным значением для перигелия, полученным из скалярной теории; это было несколько лет спустя. Я вспомнил о скалярной теории при виде полученных мной и Гроссманом чуть позже уравнений и изрядно тогда испугался, уж больно они показались сложными. Да, путаницы было много, хотя и поменьше, чем в пражский период. В Цюрихе я был уверен в том, что нашел правильный отправной пункт. Кро-

ме того, в Цюрихе мне казалось, что я нашел аргумент, позволяющий показать, что скалярная теория, ну, знаете, теория Нордстрёма, противоречит принципу эквивалентности. Но вскоре я понял, что ошибался. В 1914 г. мне стало казаться, что теория Нордстрёма вполне правдоподобна.

Но вернемся в Прагу. Единственное, в чем я тогда был твердо уверен,— это в том, что в фундаментальные уравнения необходимо включить принцип эквивалентности. А знаете ли вы, что в то время я даже не слышал об опыте Этвеша? Ах, знаете... Да, вот в таком я был положении. Мне не хватало какого-нибудь парадокса. С квантовой теорией раньше дело обстояло по-иному. Берлинские опыты по излучению черного тела ясно продемонстрировали, что с классической физикой что-то неладно. С принципом же эквивалентности и теорией Ньютона все было в порядке, они прекрасно стыковались друг с другом. И тем не менее, я был убежден, что несмотря на свои успехи теория Ньютона неполна. Я отнюдь не утратил веры в специальную теорию относительности, но полагал, что и она неполна. Поэтому в Праге я поступил примерно так. Я знал, что построение теории тяготения нужно начать заново. Естественно, теория Ньютона и специальная теория относительности должны были следовать из нее в виде неких приближений. Но я не знал, как поступить. Я находился на „ничьей земле". Поэтому я решил сначала проанализировать статические случаи и продвигаться в этом направлении до тех пор, пока не наткнусь на какие-нибудь противоречия. Я надеялся, что эти противоречия подскажут мне, каким должен быть следующий шаг. Видите ли, в то время я думал о теории Ньютона примерно так же, как думаю сейчас о квантовой механике. Она тоже кажется мне наивной теорией, и я думаю, что нужно начать разрабатывать ее заново, сначала пересмотрев перелятивистскую теорию, точно так, как я поступил с тяготением в Праге...»[8]).

На этом вымышленный монолог Эйнштейна заканчивается. Теперь я вновь возвращаюсь к статьям 1912 г., для того чтобы сделать три заключительных замечания.

Включение электромагнетизма заставило Эйнштейна обобщить смысл символа ρ в уравнении (11.10), так как энергия электромагнитного поля имеет соответствующий эквивалент гравитационной массы.

Г. Источником гравитационного поля должна быть «плотность весомой материи или, точнее, сумма плотности весомой материи и плотности энергии, измеренной „карманными приборами"».

---

[8]) Как будет видно из последующих глав, упоминание в этом отрывке имен других физиков, отражает действительное положение вещей.

Применительно к системе, состоящей из электрически заряженных частиц и электромагнитных полей, это, по-видимому, означает, что ρ должно быть заменено суммой членов, соответствующих «механическому» и электромагнитному компонентам. Эйнштейн обозначил эту сумму символом σ. Но тут возник парадокс. При более внимательном рассмотрении Эйнштейн отметил, что данная теория не удовлетворяет законам сохранения энергии и импульса: «...мы пришли к довольно рискованному результату, который может вызвать сомнения в справедливости всей развитой здесь теории». Но он нашел способ разрешить этот парадокс.

Д. «Если любая плотность энергии... дает некоторую (отрицательную) дивергенцию силовых линий гравитации, то это должно сохраняться также и для плотности энергии самой гравитации». Это соображение привело Эйнштейна к окончательному уравнению для его поля c:

$$\Delta c = k[c\sigma + (\nabla c)^2/2kc]. \qquad (11.14)$$

Далее Эйнштейн показал, что второе слагаемое в квадратных скобках есть плотность энергии гравитационного поля и что включение нового члена гарантирует выполнение законов сохранения. С этого момента он был готов к нелинейной теории гравитационного поля!

Эйнштейну было «тяжело решиться» на это последнее изменение уравнения для c-поля, поскольку, по его словам, «с ним мы покидаем область справедливости принципа эквивалентности». Вспомним, что говорилось при обсуждении уравнения (11.9): именно оно в сочетании с принципом эквивалентности позволило для случая отсутствия источника записать соотношение $\Delta c = 0$. Но такой подход не годится для уравнения (11.14) при $\sigma = 0$! Как же быть?

Е. «По-видимому, [принцип эквивалентности] можно сохранить только для бесконечно слабых полей. Наш вывод уравнений движения материальной точки и уравнений электромагнитного поля справедлив только потому, что уравнения [(11.8) и (11.9)] применяются в нем к бесконечно малым областям пространства».

Так вдалеке забрезжила правильная формулировка эквивалентности как принципа, справедливого лишь локально.

Итак, резюмируем пражские работы[9]). К весне 1912 г. Эйнштейн уже знал о красном смещении и отклонении света. Он понял, что преобразования Лоренца применимы не всегда, что нужна более широкая инвариантная группа и что законы физики станут соответственно более сложными. От примитивной скалярной модели теории поля он перешел к вариационному принципу, указав на общую справедливость выражения $\delta \int ds = 0$ для механических систем. Он понял, что источником

[9]) Третья небольшая работа, посвященная теории c-поля и также написанная в Праге [E19], будет обсуждаться позднее.

гравитационного поля может быть не только весомая материя, но и энергия поля. Эйнштейн осознал, что энергия гравитационного поля также должна считаться его источником и что уравнения гравитационного поля поэтому должны быть нелинейными. Он пришел к выводу, что принцип эквивалентности, судя по всему, выполняется лишь локально. Однако теория тяготения им еще не была создана. Правда, физику за это время Эйнштейн изучил основательно.

Глава 12. СОТРУДНИЧЕСТВО ЭЙНШТЕЙНА С ГРОССМАНОМ

Памяти Марселя Гроссмана...

§ 12.1. Из Праги в Цюрих

В предыдущих главах мы познакомились с Гроссманом — сокурсником Эйнштейна, дававшим ему конспекты; другом, чей отец устроил назначение Эйнштейна в патентное бюро в Берне; человеком, которому Эйнштейн посвятил свою диссертацию. Настало время познакомиться с ним поближе.

Гроссман, потомок древнего швейцарского рода, родился в 1878 г. в Будапеште, где в то время работал его отец. Первые 15 лет жизни он провел там, а потом уехал в Швейцарию, где и окончил среднюю школу. После этого с 1896 по 1900 г. он вместе с Эйнштейном учился в политехникуме. В течение следующих семи лет он преподавал в средней школе сначала в Фрауэнфельде, а затем в Базеле. За это время он написал диссертацию, озаглавленную «О метрических свойствах коллинеарных структур», защитив которую получил в Цюрихском университете докторскую степень, опубликовал два учебника по геометрии для школы и три работы по своей любимой теме — неевклидовой геометрии. В этих работах содержатся превосходные планиметрические построения, которые, как говорят, одобрил сам Гильберт [S1]. После шестилетнего перерыва в 1910—1912 гг. Гроссман опубликовал еще четыре статьи по смежным темам. Одну из них он доложил на пятом Международном математическом конгрессе в Кембридже, в августе 1912 г. [G1]. Перечисленные работы составляли весь его научный багаж, когда началось их сотрудничество с Эйнштейном (через несколько месяцев после кембриджского конгресса). Очевидно, что ни одна из этих работ не имеет никакого отношения ни к дифференциальной геометрии, ни к тензорному анализу.

Гроссмана приняли на математический факультет политехникума сначала в качестве почасовика, а затем, в 1907 г., в качестве профессора, читающего лекции по геометрии. Вскоре после этого он начал устраивать летние курсы для преподавателей школы. В 1910 г. Гроссман стал одним из основателей Швейцарского математического общества, а в следующем го-

ду — деканом физико-математического факультета политехникума.

Вступив в должность, непривычно молодой декан сразу же решил узнать, как смотрит Эйнштейн на возвращение в Цюрих, на этот раз в политехникум. Письмо Гроссмана утеряно, но сохранился ответ Эйнштейна: «Конечно, я в принципе готов преподавать у вас [в политехникуме]. Предложение вернуться в Цюрих меня очень радует. Из-за него я на днях отказался от предложения перейти в Утрехтский университет» [E1]. Инициатива Гроссмана имела все шансы на успех, однако надо было торопиться — Эйнштейн стал весьма популярен. Предложение из Утрехта, сделанное Виллемом Джулиусом, «одним из наиболее оригинальных исследователей в области физики Солнца» [E2], было лишь одним из первых, полученных Эйнштейном в 1911—1912 гг. Но Эйнштейн оставался непоколебим — он хотел в Цюрих. Еще до того, как были предприняты официальные шаги, он телеграфировал Цангеру: «Ответил согласием Гроссману» [E3]. Цангер лично обратился к кантональным властям, призывая поторопиться, так как слышал о намерении Венского университета предложить Эйнштейну кафедру [S2, с. 226]. Кроме того, Эйнштейн написал Цангеру об отклоненном им предложении прочесть осенью 1912 г. несколько лекций в Колумбийском университете в Нью-Йорке [E4].

В 1912 г., 23 января руководство политехникума направило департаменту внутренних дел рекомендацию о заключении с Эйнштейном десятилетнего контракта [S2, с. 227—233]. К рекомендации был приложен отзыв Марии Кюри («...мы вправе возлагать на него огромные надежды, в будущем он станет одним из ведущих теоретиков...») и отзыв Пуанкаре (уже упоминавшийся в гл. 8). Предложение было сразу принято, и 2 февраля Эйнштейн писал Альфреду Штерну: «Два дня назад я получил вызов из [политехникума] (аллилуйя!) и уже объявил здесь о своем „к. к.“[1]) отъезде» [E5]. Так, осенью 1912 г. начался новый этап научной карьеры Эйнштейна.

Продолжался он всего три семестра. Предложения о переезде в Берлин направлялись Эйнштейну еще до его приезда в Цюрих. Весной 1912 г. Эмиль Варбург, директор физико-технического института, предложил ему работу в этом институте, но к тому времени уже были закончены все формальности, связанные с назначением Эйнштейна в политехникум. Предложение из Вены также пришло после того, как он решил вернуться в Цюрих. «Я отказался рассматривать все эти предложения до тех пор, пока не устроюсь в Цюрихе»,— писал Эйнштейн Цангеру, который уже знал об инициативах Вены и Берлина [E6].

Был, правда, человек, который в то время мог повлиять на решение Эйнштейна и, возможно, на его судьбу. Этим челове-

---

[1]) «Кайзеровском и королевском» — сокращения этих слов фигурировали в официальном названии Австро-Венгерской империи.

ком был Лоренц. В октябре 1911 г. во время Сольвеевского конгресса он спросил у Эйнштейна, как тот смотрит на переезд в Утрехт [L1]. Вероятно, Эйнштейн засомневался, действительно ли Лоренц намеревался предложить занять кафедру в Утрехте иностранцу. Во всяком случае, вернувшись в Прагу, он написал Лоренцу: «Пишу Вам с тяжелым сердцем, как будто был несправедлив по отношению к родному отцу... Знай я, что Вы хотите, чтобы я переехал в Утрехт, я бы так и сделал» [E7]. Лоренц посоветовал Эйнштейну не огорчаться и со спокойной душой отправляться в Цюрих [L1]. Вскоре он снова выступил в роли духовного отца», и 9 февраля 1912 г. Эйнштейн признался Цангеру: «Лоренц зовет меня в Лейден и предлагает занять свое место. Хорошо, что я уже связан обещанием остаться в Цюрихе, иначе мне пришлось бы принять это предложение» [E8]. Должность в Лейдене занял Эренфест, который приступил к работе осенью 1912 г. В 1913 г. Эйнштейн послал Эренфесту письмо, которое, наверное, частенько наводило того на размышления: «Узнав о том, что Лоренц зовет меня в Лейден, я содрогнулся» [E9].

§ 12.2. От скаляра к тензору

В августе 1912 г. Эйнштейн с семьей вернулся в Цюрих. Десятого числа того же месяца он официально зарегистрировал свое проживание по адресу Гофштрассе, 116. В период между 10 и 16 августа Эйнштейну стало ясно, что математическим аппаратом того, что мы сейчас называем общей теорией относительности, должна быть геометрия Римана. Эта внезапная догадка изменила отношение Эйнштейна к физике и физическим теориям на всю оставшуюся жизнь. Последующие три года стали наиболее изнурительным периодом в его научной карьере.

Для того чтобы понять, что произошло в августе 1912 г., важно помнить, что еще до переезда в Цюрих Эйнштейн решил отказаться от построения теории тяготения на основе единственного скалярного c-поля и пришел к выводу о необходимости использовать новую геометрию физического пространства-времени. Я убежден в том, что в Цюрих он приехал, полностью сознавая необходимость использования не одного, а десяти гравитационных потенциалов. Эта убежденность основана на некоторых замечаниях в статьях Эйнштейна, на изучении в архиве Эйнштейна в Принстоне всей его переписки с марта по 16 августа 1912 г., а также на воспоминаниях Эрнста Габора Страуса, ассистента Эйнштейна с 1944 по 1948 г., и на моих собственных воспоминаниях.

Для начала вспомним, что вторая из работ 1912 г., обсуждавшихся в предыдущей главе, была закончена в марте [E10]. В конце того же месяца Эйнштейн пишет Бессо: «С недавнего времени я лихорадочно работаю над проблемой тяготения. Сейчас я нахожусь на стадии, когда со статикой все ясно. О дина-

мическом поле, к которому теперь надо переходить, я не знаю ничего... Каждый шаг дьявольски труден» [E11][2]). Как видно, поначалу он относился к законченной части — статике — положительно. Эйнштейн писал из Праги Эренфесту: «Исследование, посвященное статике тяготения, готово и вызывает у меня огромное удовлетворение. Кажется, мне действительно удалось найти крупицу истины. Сейчас я думаю над динамикой, вновь пытаюсь перейти от частного к общему» [E12]. Это не датированное автором письмо, несомненно, было написано в 1912 г. и, вероятнее всего, до середины мая, так как к тому времени уверенности у Эйнштейна поубавилось. В письме Цангеру от 20 мая читаем: «Исследование проблемы тяготения позволило получить некоторые удовлетворительные результаты, хотя до сих пор мне не удалось продвинуться дальше *статики*» [E13]. В некоторых письмах были намеки на трудности: «Дальнейшее развитие теории тяготения наталкивается на значительные препятствия» [E14]. В этом не датированном письме Цангеру содержится также упоминание об открытии Лауэ дифракции рентгеновских лучей. Поздравительное письмо Лауэ Эйнштейн послал в июне [E15]; весьма вероятно, что и письмо Цангеру было написано тогда же. В другом письме, определенно написанном в июне, есть примерно такое же замечание: «Обобщение [статического случая] представляется очень трудным» [E16]. Но во всех этих многочисленных упоминаниях о трудностях мы ни разу не встречаем выражения сомнений в отношении результатов, полученных для красного смещения и искривления лучей света. Эйнштейн ни разу не усомнился в том, что эти явления станут частью будущей физики. Вот, например, как он пишет в июне: «Вы спрашиваете, что говорят коллеги по поводу отказа от принципа постоянства скорости света? Они стараются выйти из положения, ставя под сомнение гравитационное действие энергии. Но это, несомненно, страусиная политика» [E16]. Как мне кажется, Эйнштейн был уверен, что движется в правильном направлении, но постепенно склонялся к выводу о том, что ему не хватает существенно важного математического инструмента.

В последней из написанных в Праге, июльской, статье есть короткое и загадочное замечание, из которого видно, что Эйнштейн напал на что-то новое. Эта статья (написанная в ходе полемики с Абрагамом, к которой я еще вернусь) содержит следующую фразу: «...пространственно-временные координаты теряют свой простой физический смысл, и нельзя предвидеть, *какую форму могут иметь общие уравнения пространственно-временных преобразований* (курсив мой.— *А. П.*). Хочу предложить всем специалистам попробовать свои силы в решении этой важной задачи!» [E17]. Обратите внимание на восклицательный знак в конце фразы. Я не знаю, сколь часто он встре-

[2]) Этого важного письма нет в опубликованной переписке Эйнштейна и Бессо.

чается в работах Эйнштейна, но уже во всяком случае не на каждом шагу.

Как уже упоминалось, 10 августа Эйнштейн зарегистрировался как житель Цюриха, а 16 августа написал Хопфу письмо, в котором нет и следа упоминаний о дьявольских трудностях и значительных препятствиях: «С тяготением все обстоит великолепно. Если это не иллюзия, то я нашел наиболее общие уравнения» [E18][3]).

Что же произошло в июле и в начале августа 1912 г.?

Об этом дважды рассказывал сам Эйнштейн. Во время выступления в Киото (декабрь 1922 г.) он сказал: «Если все [ускоренные] системы отсчета эквивалентны, то евклидова геометрия не может использоваться во всех из них. Отбросить геометрию и сохранить [физические] законы — все равно, что попытаться выразить мысль без слов. Чтобы выразить мысль, нужно найти сначала соответствующие слова. Что же тогда следовало искать? Решение никак не давалось мне, но в 1912 г. я вдруг понял, что ключ к решению загадки лежит в гауссовой теории поверхностей. Я осознал, что гауссовы поверхностные координаты имеют глубокий смысл. Но я не знал тогда, что Риман исследовал основы геометрии еще более глубоко. Я вдруг вспомнил, что о теории Гаусса шла речь в курсе геометрии, который читал во времена моего студенчества Гейзер... Я понял, что основы геометрии имеют физический смысл. После возвращения из Праги в Цюрих я встретился со своим дорогим другом математиком Гроссманом. От него я впервые услышал о Риччи и позднее о Римане. *Я спросил своего друга, можно ли решить стоящую передо мной задачу при помощи теории Римана* (курсив мой.— *А. П.*), а именно, могут ли инварианты линейного элемента полностью определить те величины, которые я ищу» [I1].

По поводу той роли, которую сыграл Карл Фредерик Гейзер[4]), можно сказать, что Эйнштейн прослушал по меньшей мере часть его курса [K2]. В конце жизни Эйнштейн с восхищением вспоминал о курсе его лекций [S2, с. 38] по дифференциальной геометрии [E19]. Из конспектов Гроссмана (хранящихся в политехникуме) видно, что Гейзер преподавал гауссову теорию поверхностей.

Мне кажется, что это первое знакомство с дифференциальной геометрией лишь косвенно повлияло на ход мыслей Эйнштейна в 1912 г. В ходе продолжительных бесед с Эйнштейном в Праге математик Георг Пик высказал предположение о том,

---

[3]) Один из биографов Эйнштейна вместо *наиболее общие* написал в цитате просто *общие* [S2, с. 242] — отнюдь не тривиальное изменение этой исключительно важной фразы.

[4]) Гейзер был знающим и влиятельным математиком, много делавшим для укрепления репутации математического факультета в политехникуме. Его преемником стал Герман Вейль.

что математический аппарат, необходимый для дальнейшего развития идей Эйнштейна, может содержаться в работах Риччи и Леви-Чивиты [F1]. Сомневаюсь, чтобы это предположение как-то повлияло на Эйнштейна в то время. Во всяком случае, в пражский период он не потрудился ознакомиться с этими важными работами.

Второй раз о периоде июль — август 1912 г. Эйнштейн высказался в 1923 г.: «К окончательной идее об аналогии между математической проблемой [общей теории относительности] и гауссовой теорией поверхностей я пришел лишь в 1912 г., после возвращения в Цюрих. Тогда я еще не знал о работах Римана, Риччи и Леви-Чивиты. О них мне сообщил мой друг Гроссман, *когда я рассказал ему о том, что ищу общековариантные тензоры, компоненты которых зависели бы только от производных коэффициентов $g_{\mu\nu}$ квадратичного фундаментального инварианта $g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$*» (курсив мой.— *А. П.*) [E20].

Из этих двух заявлений видно, что уже в последние недели пребывания в Праге Эйнштейн знал о том, что ему требуется теория инвариантов и ковариантов, в которой присутствовал бы дифференциальный линейный элемент

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu, \qquad (12.1)$$

где десять величин $g_{\mu\nu}$ рассматриваются как *динамические поля*, некоторым образом описывающие гравитацию. Видимо, сразу же после переезда в Цюрих он рассказал Гроссману о тех проблемах, которые пытался решить. Скорее всего, именно тогда он сказал: «Гроссман, ты должен мне помочь или я свихнусь!» [K2]. Как видно из письма Эйнштейна Хопфу, с помощью Гроссмана великий переход к римановой геометрии, вероятнее всего, произошел в неделю, предшествовавшую 16 августа.

Такой вывод совпадает и с моими воспоминаниями о беседе с Эйнштейном, в ходе которой я спросил его, как началось сотрудничество с Гроссманом. Я очень хорошо, хотя и не дословно, помню ответ Эйнштейна. Он рассказал Гроссману о своих проблемах и попросил его сходить в библиотеку и посмотреть, существует ли геометрия, подходящая для решения таких задач. На следующий день, как рассказал Эйнштейн, Гроссман пришел и сказал, что такая геометрия и вправду существует — это риманова геометрия. Вполне вероятно, что Гроссману пришлось обратиться к литературе, поскольку, как мы видели, та область, которой он занимался, была весьма далека от дифференциальной геометрии.

Есть также составленная в любопытных выражениях благодарность Гроссману, которая, по-моему, подтверждает мои воспоминания. Ее можно найти в конце введения к первой монографии Эйнштейна, посвященной общей теории относительности (1916): «Наконец, хочу поблагодарить здесь своего друга, математика М. Гроссмана, который не только избавил меня от

изучения специальной математической литературы, но и поддержал при поисках уравнений гравитационного поля» [E21].

Еще одним воспоминанием со мной поделился Страус [S3]. Он тоже припоминает, что к моменту встречи с Гроссманом Эйнштейн уже думал об общей ковариантности. Эйнштейн сказал Гроссману, что ему нужна геометрия, в которой уравнение (12.1) при наиболее общих преобразованиях оставалось бы инвариантным. Гроссман ответил, что тогда следует использовать риманову геометрию. (Страус не знает, просил ли Эйнштейн Гроссмана просмотреть литературу.) Но, добавил Гроссман, это ужасная каша, в которую физику нечего и соваться. Тогда Эйнштейн спросил, есть ли другие геометрии, которые можно было бы использовать. Нет, ответил Гроссман, и указал на то, что по его мнению было недостатком дифференциальных уравнений римановой геометрии — их нелинейность. На это последнее замечание Эйнштейн возразил, что он, напротив, считает это значительным преимуществом. Это возражение легко понять, если вспомнить, что пражская модель показала Эйнштейну: уравнения гравитационного поля *должны быть* нелинейными, так как гравитационное поле неизбежно выступает в качестве источника самого себя [см. уравнение (11.14)].

Рассказав о том, *что* произошло в июле и начале августа 1912 г., я перехожу к вопросу о том, *как* это произошло. Эйнштейн в 1921 г. дал такой ответ: «...в системе отсчета, которая вращается относительно некоторой инерциальной системы, законы расположения твердых тел не соответствуют правилам евклидовой геометрии вследствие лоренцева сокращения; таким образом, допуская равноправное существование неинерциальных систем, мы должны отказаться от евклидовой геометрии. Без такой интерпретации был бы невозможен и решительный шаг к общековариантным уравнениям» [E22].

Рассмотрим «решительный шаг» Эйнштейна несколько подробней. В июне он написал из Праги Эренфесту: «Похоже, что [принцип] эквивалентности может выполняться только *для бесконечно малых* систем и что поэтому ускоренная система *конечных* размеров Борна не может рассматриваться как статическое гравитационное поле, т. е. такое поле не может создаваться покоящимися массами. В таком смысле вращающееся кольцо не создает статического поля, хотя это поле и не изменяется во времени... В теории электричества рассматриваемый мной случай соответствует электростатическому полю; с другой стороны, рассмотрение статики в общем случае предполагает, дополнительно, включение аналога статического магнитного поля. Так далеко я еще не продвинулся. Полученные мной уравнения должны относиться лишь к статическому случаю покоящихся масс. Поле конечной протяженности Борна не относится к такой категории. Мне пока неясно, почему принцип эквивалентности оказывается несправедливым для *конечных* полей

(Борна)» [E23][5]). Эйнштейн не был выдающимся знатоком научной литературы, но, очевидно, знал о главной работе Борна 1909 г., в которой рассматривались релятивистские проблемы твердого тела [B1]. На зальцбургской конференции осенью 1909 г. Борн докладывал свою работу по твердому телу [B2] непосредственно перед сообщением Эйнштейна о составе излучения [E25]; известно, что оба ученых воспользовались этой встречей, для того чтобы в частном порядке обсудить научные вопросы, представлявшие для них обоих столь большой интерес [B3]. Как видно из письма Эренфесту, в июне 1912 г. Эйнштейн размышлял над ранней статьей Борна. Это забавно, поскольку использованный Борном в 1909 г. формализм, несомненно, имеет римановы черты! Мне хочется объяснить, почему так получилось.

Два основных момента работы Борна сводятся к определению жесткости как предельного свойства непрерывно деформируемой среды (при игнорировании всех аспектов ее атомного строения) и к определению жесткости лишь как дифференциального, а не интегрального свойства. Сначала Борн рассмотрел нерелятивистскую механику Ньютона. Пусть ξ^i $(i = 1, 2, 3)$ есть декартовы координаты некоторой точки среды в момент $t = 0$. Расстояние ds между двумя точками ξ^i и $\xi^i + d\xi^i$ при $t = 0$ задается выражением

$$ds^2 = \sum_{i=1}^{3} (d\xi^i)^2. \tag{12.2}$$

Пусть $x^i(\xi^i, t)$ — координаты в момент времени t той точки, которая при $t = 0$ имела координаты ξ_i. Применим так называемый метод Лагранжа, при котором для описания поведения каждой частицы жидкости используются функции x^i [L2]. В момент t расстояние между двумя бесконечно близкими точками задается выражением $ds^2 = \sum (dx^i)^2$. Так как

$$dx^i = \sum_j \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} d\xi^j, \tag{12.3}$$

имеем

$$ds^2 = \sum_{k,l=1} p_{kl}(\xi, t)\, d\xi^k d\xi^l, \tag{12.4}$$

$$p_{kl}(\xi, t) = \sum_{ij} \frac{\partial x^i}{\partial \xi^k} \frac{\partial x^j}{\partial \xi^l} \delta_{ij}. \tag{12.5}$$

Величины p_{kl} в общем случае представляют собой зависящие от времени *поля*, удовлетворяющие соотношению $p_{kl}(\xi, 0) = \delta_{kl}$.

[5]) В короткой статье «Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электромагнитной индукции?» [E24], опубликованной в «Quarterly for Forensic Medicine» («Журнал судебной медицины»), Эйнштейн несколько развил электромагнитную аналогию, упоминавшуюся в письме к Эренфесту. Эйнштейн выбрал для публикации этот необычный журнал с тем, чтобы внести свой вклад в подготовку Цангером юбилейного выпуска. А может быть, он просто сомневался в полученном результате.

В ньютоновом пределе бесконечно малое условие жесткости Борна имеет вид $dp_\mu/dt = 0$. Это есть условие инвариантности — величина ds^2 остается неизменной и всегда имеет значение, задаваемое евклидовым выражением [см. (12.2)].

Затем Борн попытался осуществить обобщение и перейти от механики Ньютона к СТО, используя «релятивистский метод Лагранжа». Вместо координат $x^i(\xi^i, t)$ он ввел $x^\mu(\xi^\mu)$, $x^4 = ict$ ($\xi^4 = ic\tau$ — собственное время) и получил

$$dx^\mu = \sum_{\mu=1}^{4} \frac{\partial x^\mu}{\partial \xi^\nu} d\xi^\nu. \tag{12.6}$$

Линейный элемент Минковского

$$ds^2 = \sum (dx^\mu)^2, \tag{12.7}$$

выраженный в лагранжевых координатах, теперь имеет вид

$$ds^2 = \sum A_{\mu\nu}(\xi^\mu)\, d\xi^\mu d\xi^\nu. \tag{12.8}$$

Рассмотрим те мировые точки, которые наблюдатель, движущийся с 4-скоростью u^μ вместе с элементом объема, видит в один и тот же момент времени $d\xi^\nu$: $u_\mu d\xi^\nu \partial x^\mu/\partial \xi^\nu = 0$. Применим это соотношение для того, чтобы исключить $d\xi^4$ из уравнения (12.8). Тогда уравнение (12.8) может быть записано в форме (12.4) с условием жесткости $dp_\mu/d\tau = 0$. Эренфест [E26] и Герглоц [H1] указали на то, что релятивистский критерий локальной жесткости Борна, относящийся к элементу объема тела, в общем случае движения может быть сформулирован следующим образом. По отношению к покоящемуся наблюдателю данный элемент объема испытывает лоренцево сокращение, соответствующее мгновенной скорости центра элемента объема. Нам нет необходимости рассматривать здесь парадоксы, к которым приводит такой подход применительно к *конечному* телу, о чем упоминал Эйнштейн в своем письме Эренфесту от 7 июня. Читателя, интересующегося подробностями, я отсылаю к статье Паули из энциклопедии [P1].

Борн рассуждал примерно так. Для механики Ньютона введем трехмерное многообразие, в котором уравнение (12.4) определяет метрику Римана. Преобразования (12.3) являются точечными преобразованиями, линейными относительно дифференциалов и оставляющими элемент мировой линии ds^2 инвариантным. Значение p_μ определяется динамикой движения среды. Далее произведем обобщение для четырех измерений.

Теперь я возвращаюсь к Эйнштейну. В своих работах он не касался проблемы твердого тела до 1916 г. [E27]. Но не вдохновил ли его формализм Борна на поиск ковариантности?

Как бы то ни было, после первых бесед с Гроссманом Эйнштейн нашел верный отправной пункт для построения ОТО. Теперь можно было по-настоящему приниматься за работу. Наступили тяжелые времена... В октябре Эйнштейн писал Зом-

мерфельду: «Сейчас я полностью поглощен проблемой тяготения и надеюсь с помощью друга-математика преодолеть все трудности. Об одном могу сказать с уверенностью — никогда в жизни я не трудился так напряженно; кроме того, я проникся огромным уважением к математике, тонкости которой до сих пор по простоте душевной считал излишней роскошью. По сравнению с этой проблемой первоначальная теория относительности выглядит детской игрушкой» [E28].

§ 12.3. Сотрудничество

В статье Эйнштейна и Гроссмана (которая далее для краткости будет называться ЭГ), опубликованной в 1913 г. [E29], содержатся глубокое физическое понимание природы измерений, некоторые верные уравнения ОТО, а также ряд ошибочных рассуждений и неуклюжих обозначений.

Сначала несколько слов об обозначениях. В работе введено понятие ковариантных и контравариантных тензоров, но все индексы помещены внизу. Например, ковариантный метрический тензор обозначен $g_{\mu\nu}$, а контравариантный — $\gamma_{\mu\nu}$. В 1914 г. Эйнштейн отказался от этой неудобной системы обозначений. «Следуя Риччи и Леви-Чивите, мы обозначаем контравариантный характер тензора тем, что поднимаем индекс вверх» [E30]. Но даже тогда это не относилось к дифференциалам координат dx^μ. В ЭГ авторы не придерживались современного правила, согласно которому автоматически предполагается суммирование по повторяющимся индексам. Это правило было введено в 1916 г. и никем иным, как Эйнштейном [E27, разд. 5]. Позже он как-то сказал в шутку: «Я сделал большое открытие в математике — предложил выбросить знак суммирования в том случае, когда суммирование должно производиться по дважды встречающемуся индексу...» [K2]. Не стоит из стремления к исторической правде пользоваться обозначениями ЭГ; вряд ли это пойдет на пользу делу. Вместо этого я запишу все уравнения ЭГ в их современном виде, используя обозначения и правила, приводимые в книге Вейнберга по гравитации и космологии [W1]. Все подробности, которые можно найти в указанной книге, будут опущены.

В ЭГ Эйнштейн упоминает о том, что некоторые из своих идей он почерпнул у Маха. Влияние Маха на Эйнштейна, само по себе представляющее тему отдельного исследования, обсуждается в гл. 15.

Как мы видели, принцип эквивалентности в его примитивной форме (равенства гравитационной и инертной масс для материальных тел) постоянно был в центре внимания Эйнштейна после 1907 г. И это весьма примечательно, так как из-за плохого знания литературы Эйнштейн узнал о прецизионных измерениях барона Роланда Этвеша из Вашингтонамени через пять лет. Эти измерения с высокой точностью продемон-

стрировали равенство гравитационной и инертной масс. Впервые опыт Этвеша упоминается Эйнштейном в ЭГ: «...представляется, что... гипотеза эквивалентности, выражающая физическую равнозначность тяжелой и инертной масс, в высшей степени вероятна»[6]).

Теперь, после вступительных замечаний, рассмотрим вклад Гроссмана в ЭГ. «Эйнштейн вырос на традициях Кристоффеля — Риччи»,— писал в истории математики XIX в. Кристиан Феликс Клейн [K3]. В этой замечательной работе показано, что с математической точки зрения ОТО может считаться одной из кульминаций в исследованиях, восходящих к работам Карла Фридриха Гаусса, Георга Бернхарда Римана, Эльвина Бруно Кристоффеля, Грегорио Риччи-Курбастро, Туллио Леви-Чивиты и др. Надеюсь, что читателям оригинальные работы и книга Клейна доставят столько же удовольствия, сколько мне. Кроме того, я бы рекомендовал познакомиться с эссе Дирка Стройка, посвященным истории дифференциальной геометрии [S4]. Здесь же я попытаюсь объяснить, как Эйнштейн «вырос». В основном в ЭГ Гроссман ссылается на две работы: статью Кристоффеля «О преобразовании однородных квадратичных дифференциальных форм», написанную в Цюрихе в 1869 г. [C1], и на всеохватывающий обзор по «абсолютному дифференциальному исчислению», написанный в 1901 г. Риччи и его блестящим учеником Леви-Чивитой [R2].

Вклад Гроссмана заключается в ясном изложении римановой геометрии и тензорного исчисления. Кроме того, он математически подкрепляет некоторые из аргументов Эйнштейна. Начинает Гроссман с обсуждения инвариантности элемента длины [уравнение (12.1)] относительно преобразований

$$dx^{\mu} = a^{\mu}_{\nu} dx'^{\nu}, \qquad a^{\mu}_{\nu} = \partial x^{\mu}/\partial x'^{\nu}, \tag{12.9}$$

$$g_{\mu\nu} = a^{\lambda}_{\mu} a^{\rho}_{\nu} g_{\lambda\rho}. \tag{12.10}$$

За этим следуют определение тензоров, основные операции тензорной алгебры (см. [W1, с. 93—98]), использование метрического тензора для связи ковариантных и контравариантных тензоров и описание ковариантного дифференцирования. Напомним, что ковариантная производная $V^{\mu}_{;\lambda}$ контравариантного вектора V^{μ} определяется следующим образом:

$$V^{\mu}_{;\lambda} = \partial V^{\mu}/\partial x^{\lambda} + \Gamma^{\mu}_{\lambda\nu} V^{\nu}, \tag{12.11}$$

где аффинный коэффициент связности («трехзначковый символ Кристоффеля») $\Gamma^{\mu}_{\lambda\nu}$ не является тензором и задается выраже-

---

[6]) О предшественниках Этвеша и более поздних экспериментах можно прочитать в [W1, с. 11—13]. Описание последних, более совершенных методов измерений см. в работе Дикке с сотрудниками [R1], а также в статье В. Б. Брагинского и В. И. Панова [B4].

писи [W1, с. 103—106]

$$\Gamma^{\mu}_{\lambda\nu} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma}\left(\frac{\partial g_{\sigma\lambda}}{\partial x^{\nu}} + \frac{\partial g_{\sigma\nu}}{\partial x^{\lambda}} - \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^{\sigma}}\right). \qquad (12.12)$$

Особый интерес для ЭГ представляет операция дивергенции ковариантного тензора второго ранга $T^{\mu\nu}$ [W1, с. 98, 107]:

$$0^{\nu} \equiv T^{\mu\nu}_{;\mu} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^{\mu}} (\sqrt{g}\, T^{\mu\nu}) + \Gamma^{\nu}_{\mu\lambda} T^{\mu\lambda}, \qquad (12.13)$$

где

$$g = -\det g_{\mu\nu}. \qquad (12.14)$$

Для симметричного тензора $T^{\mu\nu}$ получаем

$$0_{\rho} = g_{\rho\nu} 0^{\nu} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^{\mu}} (\sqrt{g}\, g_{\rho\nu} T^{\mu\nu}) - \frac{1}{2} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} T^{\mu\nu}. \qquad (12.15)$$

Это соотношение Эйнштейн использовал при обсуждении закона сохранения энергии-импульса. В качестве еще одного примера ковариантного дифференцирования следует упомянуть уравнение

$$g_{\mu\nu;\rho} = 0 \qquad (12.16)$$

(см. [W1, с. 105]). Это одно из тех соотношений, которые на какое-то время сбили Эйнштейна с толку.

Отдельный раздел Гроссман посвятил антисимметричным тензорам. Он указал, что из уравнения (12.13) следует

$$F^{\mu\nu}_{;\nu} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} (\sqrt{g}\, F^{\mu\nu}), \quad \text{если} \quad F^{\mu\nu} = -F^{\nu\mu}. \qquad (12.17)$$

Кроме того, он отметил, что $\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}/\sqrt{g}$ — контравариантный тензор четвертого ранга, получаемый из символа Леви-Чивиты $\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} = +1(-1)$, если $\alpha\beta\gamma\delta$ есть четная (нечетная) перестановка индексов 0123, и $\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} = 0$ во всех остальных случаях[7]). В результате

$$F^{\alpha\beta} = \varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} F_{\gamma\delta}/\sqrt{g} \qquad (12.18)$$

представляет собой тензор, дуальный к $F_{\gamma\delta}$.

В начале заключительного раздела Гроссман написал: «Проблема нахождения дифференциальных уравнений гравитационного поля связана с рассмотрением *дифференциальных инвариантов* и *дифференциальных ковариантов* квадратичной формы [$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}$]». Затем он «преподнес» Эйнштейну главный тензор его будущей теории — «четырехзначковый символ Кристоффеля», сейчас более известный как тензор Римана — Кристоффеля [W1, с. 133]:

$$R^{\lambda}_{\mu\nu\varkappa} \equiv \partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}/\partial x^{\varkappa} - \partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\varkappa}/\partial x^{\nu} + \Gamma^{\eta}_{\mu\nu}\Gamma^{\lambda}_{\varkappa\eta} - \Gamma^{\eta}_{\mu\varkappa}\Gamma^{\lambda}_{\nu\eta}. \qquad (12.19)$$

---

[7]) Для определенности $\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}$ вводится в местной декартовой системе координат, в которой индекс нуль обозначает временное направление, а индексы 123 — пространственные направления.

Исходя из этого тензора, «можно... указать... тензор второго ранга и второго порядка [относительно производных $g_{\mu\nu}$]», тензор Риччи:

$$R_{\mu\nu} \equiv R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu} = \partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\lambda}/\partial x^{\nu} - \partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}/\partial x^{\lambda} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\alpha} - \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}\Gamma^{\lambda}_{\lambda\alpha}. \quad (12.20)$$

Зайдя так далеко, Гроссман допустил ошибку, к которой я вернусь при рассмотрении вклада Эйнштейна в ЭГ. Но сначала расскажу об условии, на котором строилось сотрудничество Гроссмана с Эйнштейном: «...он охотно согласился совместно работать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации» [E31].

Вначале Эйнштейн сформулировал свою цель — обобщить теорию относительности таким образом, чтобы полученный ранее результат, касающийся непостоянства скорости света в неоднородном статическом гравитационном поле [E10], содержался в таком обобщении в виде частного случая. Без предисловий Эйнштейн сразу же перешел к требованию общей ковариантности: движение материальной точки должно определяться уравнениями (11.12) и (12.1). Эти уравнения должны быть инвариантны относительно преобразований (12.9) и (12.10), а величина ds^2 должна быть «абсолютным инвариантом». Далее Эйнштейн изложил принцип эквивалентности в его современном виде: существует специальное преобразование типа [уравнение (12.9)]

$$dx^{\mu} = a^{\mu}_{\nu} d\xi^{\nu}, \quad (12.21)$$

которое приводит квадратичную форму [уравнение (12.1)] в местной проекции на главные оси к виду

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} d\xi^{\mu} d\xi^{\nu}, \quad (12.22)$$

$$\eta_{11} = \eta_{22} = \eta_{33} = -\eta_{00} = 1, \quad \eta_{\mu\nu} = 0, \quad \mu \neq \nu. \quad (12.23)$$

Такая местная система, в которой гравитационное поле устранено, выступает в роли бесконечно малой лаборатории, находящейся в состоянии свободного падения. Измерения пространства и времени могут выполняться внутри такой лаборатории с использованием тех же методов, что и в СТО [8]). Отсюда следует, что для dx^{μ} в общем случае, как в уравнении (12.1), «соответствующее... естественное расстояние можно измерить только в том случае, если известны величины $g_{\mu\nu}$, определяющие гравитационное поле... Гравитационное поле влияет на измерительные тела... вполне определенным образом». Эти слова знаменуют начало выполнения обширной программы построения ОТО.

Из уравнений (11.12) и (12.1) Эйнштейн выводит свойства энергии и импульса для распределения вещества массой m, где

[8]) Определение реальных свойств часов и масштабов в данном случае является весьма тонкой проблемой [M1]. Автор должен сознаться, что иногда у него возникают сомнения в том, действительно ли эта проблема понята полностью на атомном и субатомном уровнях.

«m — характерная для материальной точки постоянная, не зависящая от гравитационного потенциала». В частности, он получает выражение

$$0_{\mu\nu} = \rho_0 (dx^\mu/ds)(dx^\nu/ds) \qquad (12.24)$$

для тензора энергии-импульса вещества при отсутствии давления, где $\rho_0 = m/V_0$, а $V_0 = d\xi$ — покоящийся элемент объема непрерывно распределенных масс. Следующий шаг Эйнштейн делает с помощью уравнения (12.15). Он предполагает, что законы сохранения энергии-импульса должны иметь общековариантную форму

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\mu} (\sqrt{g}\, \theta^\mu_\rho) - \frac{1}{2} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\rho} \theta^{\mu\nu} = 0, \qquad (12.25)$$

где второй член соответствует действию гравитационного поля на вещество.

Уравнения движения по геодезической

$$d^2x^\mu/d\tau^2 + \Gamma^\mu_{\lambda\nu} (dx^\lambda/d\tau)(dx^\nu/d\tau) = 0 \qquad (12.26)$$

[$d\tau = (-g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu)^{1/2}$ — собственное время] для частицы с ненулевой массой в ЭГ *нет* (Эйнштейн впервые получил его в 1914 г.). Подчеркнуть это необходимо потому, что авторы данной работы столкнулись с определенными трудностями при попытке установить связь между своим результатом и ньютоновым пределом. Для удобства дальнейшего изложения напомним, как получается этот предел из уравнения движения (12.26) [W1, с. 77]: 1) членом $dx/d\tau$ в сравнении с $dt/d\tau$ можно пренебречь (скорость движения мала); 2) положим $\partial g_{\mu\nu}/\partial t = 0$ (стационарность); 3) запишем

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \qquad (12.27)$$

и сохраним лишь члены первого порядка относительно $h_{\mu\nu}$ (слабое поле). В результате получим уравнение Ньютона

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\nabla\varphi, \qquad (12.28)$$

где $\varphi = -h_{00}/2$ — ньютонов потенциал, так что

$$g_{00} = -(1 + 2\varphi). \qquad (12.29)$$

Хотя обсуждение вопросов движения вещества и не доведено до конца, пока все в порядке, в том числе и с электродинамикой. В ЭГ содержится правильная общековариантная форма уравнений Максвелла:

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\sqrt{g}\, F^{\mu\nu}) = J^\mu, \qquad (12.30)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\sqrt{g}\, F^{\mu\nu *}) = 0 \qquad (12.31)$$

[см. уравнения (12.17) и (12.18)]. Но остается последний вопрос: а где же сами уравнения гравитационного поля? Эйнштейн высказал правильную догадку о том, что «искомое уравнение

[обобщение уравнений Ньютона], по всей вероятности, должно иметь вид

$$\varkappa\theta_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\nu}, \tag{12.32}$$

где... $\Gamma_{\mu\nu}$ — контравариантный тензор второго ранга, образованный из производных фундаментального тензора $g_{\mu\nu}$».

И тут начались трудности.

§ 12.4. Камень преткновения

Очевидно, что Эйнштейн с Гроссманом искали тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ такого рода, чтобы уравнение Ньютона — Пуассона

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \tag{12.33}$$

являлось предельным случаем. Но, утверждает Эйнштейн, это невозможно, если потребовать, в духе уравнения (12.33), чтобы $\Gamma_{\mu\nu}$ был тензором не выше второго ранга относительно производных фундаментального тензора $g_{\mu\nu}$. В подтверждение этого ошибочного вывода он приводит два аргумента. Первый, содержащийся в разделе, написанном Эйнштейном, можно сформулировать так. Требуется получить обобщение $\operatorname{div}\operatorname{grad}\varphi$. Обобщением оператора градиента является ковариантное дифференцирование. Обобщением φ служит $g_{\mu\nu}$. Но ковариантная производная $g_{\mu\nu}$ обращается в нуль [см. (12.16)]! По словам Эйнштейна, «...эти операции [ковариантные выражения операций дивергенции и градиента] вырождаются, если их проделать над фундаментальным тензором $g_{\mu\nu}$. Отсюда, по-видимому, следует, что искомые уравнения должны быть ковариантными относительно... пока неизвестной нам группы преобразований».

Второй аргумент, приводимый в части, написанной Гроссманом, также неверен. Как упоминалось выше, Гроссман видел, что тензор Риччи [см. (12.20)] вполне может претендовать на то, чтобы занять место тензора $\Gamma_{\mu\nu}$ в уравнении (12.32). Однако, по мнению Гроссмана, «в частном случае бесконечно слабого статического поля тяжести этот тензор не сводится к $\Delta\varphi$». Поэтому авторы неохотно делают вывод о том, что для уравнений гравитационного поля инвариантная группа должна быть ограничена только линейными преобразованиями ($\partial x^\alpha/\partial x'^\beta$ не зависит от x^μ), так как тогда, по их утверждению, член $(\partial/\partial x^\mu)(g^{\mu\nu}\partial g_{\rho\sigma}/\partial x^\nu)$ преобразуется как тензор, который, более того, в слабополном пределе, задаваемом уравнением (12.27), сводится к $\Box g_{\rho\sigma}$. «Если поле статическое и переменной является только величина g_{44} [как функция от x], то мы приходим к случаю ньютоновой теории гравитации». Вызывающее трудности уравнение (12.16) удалось обойти!

Эйнштейн дал также «физические доводы» невозможности обеспечения общековариантности уравнений гравитационного поля. Это обоснование, хотя, конечно, и неверное, тем не менее, имеет определенный интерес. Рассмотрим, говорит Эйн-

штейн, некоторую область четырехмерного пространства-времени, разделенную на две части L_1 и L_2. Источник гравитационного поля $\theta_{\mu\nu}$ [см. (12.32)] должен быть отличен от нуля только в L_1. Тем не менее, по уравнению (12.32) источник $\theta_{\mu\nu}$ определяет величину $g_{\mu\nu}$ во всей области L. Выполним общековариантное преобразование $x_\mu \to x'_\mu$ такое, что $x_\mu = x'_\mu$ в L_1, в то время как по крайней мере в части L_2 $x_\mu \neq x'_\mu$; тогда в этой части L_2 $g_{\mu\nu} \neq g'_{\mu\nu}$. Источник $\theta_{\mu\nu}$ не изменяется: $\theta_{\mu\nu} = \theta'_{\mu\nu}$ в L_1, в то время как в L_2 величина $\theta_{\mu\nu}$, однажды обратившись в нуль, остается равной нулю. Поэтому из требования общековариантности следует, что для заданного распределения $\theta_{\mu\nu}$ допускается больше одного распределения величины $g_{\mu\nu}$. «*Если — как это делается в нашей работе — придерживаться требования, чтобы* $\theta_{\mu\nu}$ *полностью определяли значения* $[g_{\mu\nu}]$, *то приходится ограничить выбор систем отсчета*» (курсив мой.— *А. П.*). (Отметим, что упоминавшееся выше преобразование $x_\mu \to x'_\mu$ не допускается, если преобразование линейно!) Эта аргументация вполне корректна, но в чем же тогда дело?

Неверны «физические доводы» Эйнштейна. Величины $\theta_{\mu\nu}$ *не полностью определяют* значения $g_{\mu\nu}$. Затруднение Эйнштейна было вызвано тем, что *он не знал тождеств Бьянки*. Рассмотрим уравнение (12.32) в его окончательном виде, полученном в 1915 г.:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = -\varkappa T_{\mu\nu}, \qquad (12.34)$$

где $R_{\mu\nu}$ задается уравнением (12.20), а $R = R^{\mu\nu} g_{\mu\nu}$. Левая часть удовлетворяет четырем тождествам Бьянки:

$$[R^{\mu\nu} - (1/2) g^{\mu\nu} R]_{,\nu} = 0. \qquad (12.35)$$

Поскольку имеют место такие соотношения, уравнение (12.34) не определяет значения $g_{\mu\nu}$ единственным образом — точно так же, как уравнения Максвелла не определяют единственным образом электромагнитные потенциалы [W1, с. 161]. Значения $g_{\mu\nu}$ определяются лишь с точностью до преобразования $g_{\mu\nu} \to g'_{\mu\nu}$, соответствующего произвольному преобразованию координат $x_\mu \to x'_\mu$. Эйнштейну еще нужно было понять: эта свобода отражает тот факт, что выбор координат представляет собой некую договоренность, не имеющую физического смысла. В 1915 г. он уже *знал об этом*, хотя и по-прежнему не был знаком с тождествами Бьянки (гл. 15).

Теперь нам понятны и трудности Гроссмана с ньютоновым пределом. Воспользуемся уравнением (12.27) и определим $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - (1/2)\,\eta_{\mu\nu}\eta_{\alpha\beta}h^{\alpha\beta}$. Тогда уравнение (12.34) приводится к виду

$$\Box\, h'_{\mu\nu} - \partial^2 h'_{\mu\alpha}/\partial x^\nu \partial x^\alpha - \partial^2 h'_{\nu\alpha}/\partial x^\mu \partial x^\alpha + \eta_{\mu\nu}\partial^2 h'_{\alpha\beta}/\partial x^\alpha \partial x^\beta = -\varkappa T_{\mu\nu}, \qquad (12.36)$$

по очень ясному на первый взгляд. Однако мы совершенно *свободны* выбрать такую систему координат, в которой

$$\partial h'_{\mu\alpha}/\partial x^{\alpha} = 0. \qquad (12.37)$$

В предельном случае слабого статического поля все компоненты $R_{\mu\nu}$, кроме R_{00}, пренебрежимо малы и [см. (12.29)]

$$R_{00} \approx \Delta g_{00}/2 = -\Delta\varphi, \qquad (12.38)$$

что и требовалось получить.

Эйнштейн не сразу понял, что ограничение общековариантности является недостатком теории. Он считал, что проблема решена. В начале 1913 г. в письме Эренфесту читаем: «Дело с тяготением завершилось к моему *полному удовлетворению* (я имею в виду то, что уравнения гравитационного поля ковариантны лишь относительно *линейных* преобразований). Можно отдельно доказать, что *общековариантные* уравнения, *полностью* определяющие [гравитационное] поле из тензора вещества, вообще не могут существовать. Разве может быть что-либо более прекрасное, чем такое конкретное ограничение, вытекающее из законов сохранения?» [E32].

Этим заканчивается краткий разбор аргументации, с помощью которой Эйнштейн и Гроссман пришли к гибридной теории, где можно различить некоторые основные элементы окончательной теории. Я опускаю здесь менее интересные выкладки, которые приводят к явным выражениям для $\Theta_{\mu\nu}$ и $\Gamma_{\mu\nu}$ в уравнении (12.32), удовлетворяющем законам сохранения. Усилия были приложены огромные. Принося Эренфесту извинения за долгое молчание, Эйнштейн писал в мае 1913 г.: «Оправданием мне могут послужить буквально нечеловеческие усилия, которые я прилагал, чтобы решить проблему тяготения. Теперь я внутренне убежден, что мои находки правильны и что по рядам коллег пронесется рокот возмущения, когда они познакомятся со статьей, которая должна выйти через несколько недель» [E33].

Итак, завершаю рассказ о самой сложной и рискованной части пути Эйнштейна к ОТО. Начался этот путь в 1907 г. с принципа эквивалентности, потом потянулись годы молчания, затем появились пражские работы о c-поле и, наконец, вышла совместная работа с Гроссманом. В 1913 г. теория была, конечно, еще далека от логического завершения. Но дальше все было проще. Эйнштейну требовалось в основном понять, что общековариантность *может быть* обеспечена, что тензор Риччи *действительно* является ключом к верным уравнениям гравитационного поля; после того, как он это осмыслил, последовали «три классических успеха» теории. Обо всем этом и пойдет речь в следующих главах.

§ 12.5. Последствия

В 1905 г. Эйнштейн посвятил докторскую диссертацию М. Гроссману, а в 1955 г. он посвятил свою последнюю опубликованную автобиографическую работу [E31] давно скончавшемуся старому другу. В последней части этой главы рассказывается об Эйнштейне и Гроссмане с начала сотрудничества до смерти Эйнштейна.

В 1913 г., 9 сентября сначала Эйнштейн, а затем Гроссман прочитали доклады на ежегодном собрании Швейцарского физического общества [E34, G2]. Эти доклады представляют собой упрощенный вариант их совместной статьи и не содержат ничего существенно нового. К моменту выхода в свет их следующей и последней написанной вместе статьи Эйнштейн уже переехал в Берлин [E35]. В этой статье они вновь обратились к уравнениям гравитационного поля для того, чтобы задать вопрос: каковы допустимые наиболее общие преобразования, если предположить, что значения $g_{\mu\nu}$ полностью определяются уравнениями поля? В ЭГ было показано, что для этого достаточно потребовать линейности. Теперь авторы обнаружили, что допустимы также и *некоторые* нелинейные преобразования (в том числе и различного вида ускорения). По сути, они все ближе подходили к правильному ответу — предложенный ими неверный критерий единственно допустимого способа определения $g_{\mu\nu}$ стал задаваться в виде системы из четырех необщековариантных ограничений. Как известно сейчас, четыре ограничения с такими свойствами (так называемые координатные условия) действительно должны присутствовать в корректной ОТО для того, чтобы устранить неоднозначность значений $g_{\mu\nu}$ выбором некоторой конкретной системы координат [W1, с. 162].

Все работы, опубликованные Гроссманом в течение следующих семи лет, касались вопросов педагогики и политики. В качестве примера его общественной деятельности можно отметить помощь студентам всех стран, оказавшимся в плену во время первой мировой войны. В период между 1922 и 1930 гг. он написал еще пять статей по своей любимой теме — начертательной геометрии.

К 1920 г. у Гроссмана стали проявляться первые признаки смертельного недуга — рассеянного склероза; к 1926 г. симптомы стали ярко выраженными. Его дочь Эльзбет Гроссман рассказала мне, что с этого времени он стал говорить с трудом. В 1927 г. ему пришлось уйти с должности профессора политехникума.

В 1931 г. Гроссман написал свою последнюю статью [G3]. Она является полемическим выступлением (без привлечения математического аппарата) против понятий параллельного переноса (Леви-Чивита), абсолютного параллелизма (Картан) и далекого параллелизма (Эйнштейн). Статья вышла в свет после того, как один из друзей Гроссмана рассказал ему о лек-

ции Эйнштейна, посвященной единой теории поля. Гроссман утверждал, что имеются логические возражения против всех перечисленных выше понятий. Чтение статьи вызывает чувство сожаления. Содержание ее обсуждалось в переписке Эйнштейна с Гроссманом, дружеской, но несколько натянутой. Эйнштейн также написал Картану письмо с просьбой не отвечать Гроссману публично [E36], на что Картан согласился [C2][9]).

После кончины Гроссмана, последовавшей в 1936 г., Эйнштейн направил его вдове трогательное и проникнутое глубоким уважением письмо [E37], где он пишет о «трагическом конце, постигшем ученого после нескольких лет, наполненных трудом и вдохновением». Он пишет о Гроссмане как об «образцовом студенте... находившемся в хороших отношениях с преподавателями...», в то время сам Эйнштейн «был отчужден от всех, неудовлетворен и непопулярен». Он пишет о том, как Гроссман помог ему получить работу, без которой он, «если и не умер бы, то напрасно бы растратил душевные силы». Он пишет о «совместной лихорадочной работе спустя десятилетие» и добавляет: «Но одно было действительно прекрасно — всю жизнь мы были друзьями».

Мне досадно, что Эйнштейн не сделал того, к чему он иногда проявлял такой талант и способность,— не написал некролога вскоре после кончины Гроссмана. Но он сделал это позже. В 1955 г. он написал о Гроссмане, об их сотрудничестве, о том, как Гроссман «просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема была уже решена прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой... Достижения Римана были наибольшими». Там же Эйнштейн писал: «Потребность по крайней мере один раз в жизни выразить мою благодарность Марселю Гроссману придала мне смелость написать эти довольно пестрые автобиографические наброски» [E31].

Глава 13. ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ: ПЕРВЫЕ 50 ЛЕТ

§ 13.1. Эйнштейн в Вене

Эйнштейн довольно быстро понял, что сотрудничество с Гроссманом [E1] позволило сделать некоторые выводы, шедшие вразрез с поставленной задачей. Напомним вкратце, как изменялся его подход к проблеме тяготения до весны 1913 г. В конце 1907 г. Эйнштейн обнаружил, что тяготение занимает особое положение в теории относительности. Он понял, что вопрос заключается не в том, как включить тяготение в СТО, а в том, как воспользоваться тяготением для отказа от требования ковариантности применительно к равномерному относительному движению и заменить его требованием ковариантности применительно к лю-

[9]) Оба эти письма приведены в опубликованной переписке Эйнштейна с Картаном [C3].

бым типам движения. Работая в Праге, Эйнштейн проанализировал распространение света в неоднородном гравитационном поле и пришел к выводу, что скорость света зависит от гравитационного потенциала и, значит, рамки СТО слишком узки [E2]. Уезжая из Праги, он уже представлял себе технические аспекты общековариантности, а также осознал фундаментальную роль метрического тензора как носителя тяготения. Попытавшись совместно с Гроссманом впервые построить тензорную теорию тяготения, Эйнштейн пришел к выводу о том, что уравнения гравитационного поля могут быть ковариантными лишь относительно линейных преобразований.

К августу 1913 г. Эйнштейну стало ясно, что этот вывод равносилен катастрофе. Об этом он и писал Лоренцу: «...моя вера в справедливость теории отнюдь не постоянна... Эти уравнения гравитационного поля, к сожалению, не обладают свойством общековариантности. Удается обеспечить лишь их ковариантность относительно линейных преобразований. Но моя вера в теорию по-прежнему основана на убежденности в том, что ускорение системы отсчета эквивалентно наличию поля тяготения. Вот почему, если не все системы уравнений данной теории... допускают иные типы преобразований помимо линейных, теория противоречит своему отправному пункту, и все повисает в воздухе» [E3].

Такие мысли должны были одолевать Эйнштейна, когда он отправился в Вену, чтобы прочитать там 23 сентября доклад перед Обществом естествоиспытателей [1]). Он докладывал не только о своей работе, но и о теории тяготения, разрабатываемой финским физиком Гуннаром Нордстрёмом с 1912 г. Более того, он собирался также прокомментировать еще одну из недавно созданных теорий тяготения — теорию Абрагама (мы встречались ранее с его именем при обсуждении СТО). Эйнштейн знал также, что ему предстоит обсуждать и совсем новую теорию тяготения, разработанную Густавом Ми [2]). В той или иной степени, эта лавина теорий тяготения, появившихся в 1912—1913 гг., была вызвана пражскими статьями Эйнштейна. Абрагам предложил распространить теорию Эйнштейна с переменной скоростью света в статическом гравитационном поле на нестатическое поле. Нордстрём затронул другой вопрос: нельзя ли включить принцип эквивалентности в релятивистскую теорию с постоянной скоростью света? Теория Ми была еще одним вариантом теорий, в которых c оставалась константой. Однако эта деятельность периода 1911—1913 гг. отнюдь не означает начала поисков теории гравитационного поля. В качестве предисловия к обсуждению

---

[1]) На этом заседании Эйнштейн встретился с Фридрихом Котлером и высоко оценил его успехи — Котлер первым записал уравнения Максвелла в общековариантном виде, хотя и без связи с теорией тяготения [K1]. В дальнейшем Котлер работал в области ОТО менее успешно [E3a].

[2]) Ссылки на другие работы по теории тяготения того времени можно найти в обзоре [A1].

той запутанной ситуации, которая сложилась на венской встрече 1913 г., необходимо ненадолго вернуться на полвека назад.

Великий поиск начался с замечаний Максвелла относительно векторной теории тяготения. Они приведены в его замечательном труде «Динамическая теория электромагнитного поля», завершенном в 1864 г., целью которого было «объяснить [электромагнитное] взаимодействие между удаленными друг от друга телами без допущения существования сил, способных непосредственно действовать на заметных расстояниях... [Эта] теория... может быть названа теорией электромагнитного поля» [M1][3]). Посвятив этой проблеме примерно 40 страниц, Максвелл внезапно и ненадолго обращается к тяготению: «После того как мы проследили действие окружающей среды как на магнитные, так и на электрические притяжения и отталкивания и нашли, что они обратно пропорциональны квадрату расстояний, мы, естественно, приходим к вопросу, нельзя ли свести притяжение гравитации, следующее такому же закону, к действию окружающей среды». Но как объяснить, спрашивает Максвелл, тот факт, что сила тяготения есть сила притяжения, в то время как между двумя электрическими зарядами одного знака возникает сила отталкивания? Он отмечает, что для объяснения следует специально предположить изменение знака на противоположный при переходе от электромагнитной к гравитационной пондеромоторной силе (напомним, что речь идет о векторной теории). Поэтому гравитационной энергии следует приписать дополнительный знак минус. Но это приводит к парадоксу: «...присутствие плотных тел влияет на среду в сторону уменьшения [внутренней] энергии, где только имеется результирующее притяжение. Поскольку я не могу понять, каким образом среда может обладать такими свойствами, я не могу идти дальше в этом направлении в поисках причины тяготения».

Мудрые слова Максвелла не услышали даже очень крупные физики. Оливер Хевисайд рассматривал аналогию между тяготением и электромагнетизмом, даже не упоминая о затруднении с отрицательной энергией [H1]. Примечательно, что так же поступил и Лоренц в одной из немногих статей, построенных на чисто умозрительных рассуждениях [L1], написанной в 1900 г. Он предположил, что силы отталкивания двух частиц с зарядами $(+e, +e)$ равны таким же силам для частиц $(-e, -e)$, по немного меньше (по абсолютному значению) сил притяжения между частицами $(+e, -e)$. Тогда, если рассмотреть две нейтральные покоящиеся частицы, каждая из которых представляет собой пару $(+e, -e)$, то между ними будет наблюдаться остаточное ньютоново притяжение. Формализм этой теории состоит во введении совместной системы уравнений Максвелла и пондермотор-

[3]) Здесь работы Максвелла цитируются по книге: *Максвелл Дж. К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля: Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1952.— *Примеч. пер.*

ных сил (при последних стоят соответствующие коэффициенты, подобранные так, чтобы желаемым образом можно было описать поведение различных комбинаций зарядов). В этой странной работе нигде не говорится о существовании двух законов сохранения — для зарядов и гравитационной массы покоя. Лоренц рассчитал поправки, вызванные зависимостью от скорости, к закону Ньютона и даже оценил их влияние на движение перигелия Меркурия (это влияние оказалось слишком малым). Еще несколько ученых рассматривали следствия этой теории [G1, W1]. В 1908 г. Пуанкаре отметил теорию тяготения Лоренца как пример полевой теории, совместимой с требованиями СТО [P1][4]).

Даже в 1912 г. все еще приходилось объяснять, что все эти векторные теории не имеют смысла из-за указанной Максвеллом трудности с отрицательной энергией. В то время Абрагам обратил внимание на то, что равновесие гравитационного осциллятора неустойчиво [A2]: амплитуда даже наименьшего колебания растет с излучением энергии поля тяготения, т. е. вместо затухания происходит усиление излучения. Таким образом, векторные теории были отброшены и примерно в то же время основное внимание стало уделяться скалярным теориям.

Этот короткий период времени начался выходом в свет в июне 1911 г. статьи Эйнштейна, в которой он показал, что скорость света, вообще говоря, не может считаться универсальной константой в присутствии статического поля тяготения [E4]. Спустя полгода Абрагам предпринял первую попытку распространить этот вывод на нестатические поля [A3]. Он пытался добиться невозможного — включить представление о непостоянстве скорости света в СТО. Абрагам обобщил уравнение Ньютона для точечной частицы: $\mathbf{K} = -\nabla\varphi = \mathbf{a}$, где $\mathbf{K}$ — сила тяготения, действующая на единицу массы, φ — потенциал, $\mathbf{a}$ — ускорение, и привел его к виду

$$K_\mu = -\partial\Phi/\partial x^\mu = \dot{u}_\mu, \tag{13.1}$$

где u_μ — 4-скорость, а точка означает дифференцирование по собственному времени τ. Предполагается, что функция Φ удовлетворяет уравнению типа

$$\Box\Phi = \rho, \tag{13.2}$$

где Φ и ρ — скалярные поля, а 4-скорость u_μ удовлетворяет выражению

$$u_\mu u^\mu = -c^2. \tag{13.3}$$

Из уравнений (13.1) и (13.3) следует

$$u^\mu \partial\Phi/\partial x^\mu = d\Phi/d\tau = c\, dc/d\tau, \tag{13.4}$$

---

[4]) Пуанкаре подчеркивал необходимость создания релятивистской теории тяготения еще в 1905 г. в статье [P2], в которой обсуждались некоторые общие кинематические аспекты данной проблемы без использования какой-либо конкретной модели. См. также работу Минковского [M2].

так как скорость c непостоянна. Отсюда

$$c_1^2 - c_2^2 = 2(\Phi_1 - \Phi_2), \tag{13.5}$$

или, приближенно,

$$c = c_2[1 + (\Phi_1 - \Phi_2)/c^2]. \tag{13.6}$$

Это выражение Эйнштейн получил в 1911 г. [см. уравнение (11.6)]. В данном выводе не используется уравнение (13.2). Кажется, что оно инвариантно относительно СТО, но на самом деле это, конечно, не так, поскольку скорость света не постоянна. Абрагам обратил на это внимание в своем следующем сообщении: «Непостоянство значения c означает, что лоренцева группа сохраняется лишь в бесконечно малом» [A4]; это утверждение было тут же опровергнуто Эйнштейном [E5].

По этому поводу в журнале «Annalen der Physik» развернулась дискуссия, в ходе которой Абрагам продемонстрировал недостаток такта и плохое понимание сути вопроса. Сначала [A5] Абрагам утверждал, что теория относительности угрожает здоровому развитию физики, поскольку «трезвому наблюдателю ясно, что эта теория никогда не приведет к полному описанию картины мира, если в нее не удастся... включить тяготение». Он добавил, что Эйнштейн нанес «смертельный удар теории относительности», отказавшись от безоговорочного сохранения лоренц-инвариантности [5]). «Тот, кто, подобно автору этих строк, неоднократно предупреждал о том, что нельзя дать себя убаюкать сладкоголосым напевом этой теории, с удовлетворением убедится, что теперь и ее создатель осознал непригодность данной теории». Правда, Абрагам признал справедливость технических возражений, высказанных Эйнштейном по поводу его работы, но в следующей статье [A6] он предложил свою «вторую теорию»: «Я предпочел бы разрабатывать новую теорию тяготения, не занимаясь [обсуждением] проблемы пространства-времени». Далее Абрагам полностью отказался от лоренц-инвариантности и ввел абсолютную систему отсчета (см. также [A1, с. 488]).

Эйнштейн не замедлил отреагировать, причем весьма сдержанно: «[Специальная] теория относительности в ее теперешней форме означает важный шаг вперед; я не думаю, что она затормозила дальнейшее развитие теоретической физики!.. Сомневаться во всеобщей справедливости принципа относительности [для равномерного движения] у нас нет ни малейшего основания» [E6]. Он высказал свое мнение по поводу трудной и пока не решенной проблемы тяготения и привел такое сравнение: «...это положение вещей [в теории тяготения], по-моему, никоим образом не означает крушения метода, основанного на [специальной] теории относительности, равно как открытие и правильное объяснение броуновского движения не ведет к тому, чтобы рассмат-

[5]) Отметим, что эти соображения высказывались до публикации работы Эйнштейна и Гроссмана [E1].

ривать термодинамику и гидродинамику как ересь». Эйнштейн также добавил, что сам он пока не понимает, как применять принцип эквивалентности в общем случае.

Абрагам не сдался и опубликовал свои возражения [A7], ничего не добавлявшие по существу и ядовитые по форме: «[Эйнштейн] тщится заранее присвоить себе заслуги в создании будущей теории относительности». В ответ Эйнштейн напечатал заявление из пяти строк, где отметил, что со своей стороны считает публичную дискуссию по этому вопросу законченной [E7]. В письме другу он назвал теорию Абрагама «величественной лошадью без трех ног» [E8].

Я бы не стал касаться полемики Абрагама и Эйнштейна, если бы Абрагам не был отличным физиком. Эйнштейн считал, что он лучше других разбирается в проблемах тяготения [E9]. Обзор теорий тяготения, написанный Абрагамом в 1914 г. [A1], просто великолепен. Когда в 1913 г. Эйнштейн решил перебраться из Цюриха в Берлин, он предложил Цангеру в качестве своего преемника именно Абрагама [E10][6]). Но добавил при этом: «Мне кажется, что они обойдутся без моего совета, так как я предложил кандидатуру Абрагама, которого все боятся».

У Абрагама был большой и незавидный талант усложнять себе жизнь, в особенности своим убийственным сарказмом. Между реальностью и его представлениями постоянно вставал его «злой дух» — Эйнштейн. Абрагам понимал теорию относительности, но не мог с ней примириться. Его нельзя назвать великим ученым, но он заслуживает, чтобы о нем помнили как о человеке, олицетворявшем драматизм резких перемен в науке. Умер Абрагам в 1923 г. от опухоли мозга. Борн и Лауэ вместе написали некролог: «Он был уважаемым оппонентом, сражался честно и признавал поражения без лишних споров и сетований. Абстрактные рассуждения Эйнштейна были ему глубоко чужды: он любил свой абсолютный эфир, свои уравнения поля, свой твердый электрон, они были дороги ему как первая любовь, память о которой не умирает с годами. Но он всегда сохранял ясность мышления... его возражения основывались на глубокой убежденности... а не на недостатке понимания» [B1].

Но вернемся к обсуждению хода событий до публикации совместной статьи Эйнштейна и Гроссмана. В конце 1912 г. финский физик Нордстрём из Гельсингфорса (Хельсинки) предложил остроумную идею [N1] — раз и Эйнштейн, и Абрагам столкнулись с огромными трудностями из-за зависимости Φ от c, почему бы не попытаться построить такую теорию тяготения, в которой c не зависела бы от Φ, но при этом по-прежнему оставалась универсальной константой? Как уже неоднократно упоминалось, Эйнштейн с самого начала понял, что включение тяготения означало конец безусловной справедливости СТО. Од-

[6]) В письме от 17 мая 1912 г. Эйнштейн сообщил Вину о том, что Абрагам «обратился в его теорию».

пако вопрос, поставленный Нордстрёмом, был по тем временам совершенно разумным. Примечательно, что никто до него не пошел по тому же пути (во всяком случае, об этом не упоминалось в научной литературе) до октября 1912 г.

Как мы видели на примере неверного подхода Абрагама к уравнениям (13.1)—(13.4), эта проблема отнюдь не тривиальна. Идея Нордстрёма заключалась в том, чтобы поставить в зависимость от Ф не скорость света, а массу. В общем случае он переписал уравнение (13.1) (для единицы массы) в следующем виде:

$$mK_\mu = -m\,\partial\Phi/\partial x^\mu = d(mu_\mu)/d\tau = m\dot{u}_\mu + \dot{m}u_\mu. \qquad (13.7)$$

Новизна его теории заключается в появлении члена с $\dot{m}$. Из уравнения (13.7) и из того же не изменившегося уравнения (13.3) получаем

$$mu^\mu\partial\Phi/\partial x^\mu = m\,d\Phi/d\tau = c^2dm/d\tau, \qquad (13.8)$$

откуда

$$m = m_0\exp(\Phi/c^2). \qquad (13.9)$$

Из уравнений (13.7) и (13.8) следует

$$-\partial\Phi/\partial x^\mu = \dot{u}_\mu + (u_\mu/c^2)\Phi, \qquad (13.10)$$

где m отсутствует. Уравнения (13.10) и (13.2) образуют основу первой теории Нордстрёма, в которой он отождествил величину ρ с «плотностью массы покоя» [N2]. Я не буду обсуждать детали этой несовершенной теории и сразу же перейду к его второй теории, предложенной в 1913 г. [N3]. Хотя и ей была суждена недолгая жизнь, она заслуживает того, чтобы о ней помнили как о первой логически последовательной релятивистской теории гравитационного поля.

Основная идея (которой Нордстрём обязан Лауэ и Эйнштейну) заключалась в том, что единственным возможным источником скалярного гравитационного поля является

$$T = \eta_{\mu\nu}T^{\mu\nu} \qquad (13.11)$$

— след тензора энергии-импульса $T^{\mu\nu}$ ($\eta_{\mu\nu}$ — как обычно, метрика Минковского). Все физические следствия этой теории были получены самим Нордстрёмом. Я, однако, не буду повторять здесь его вывод, а воспользуюсь простым приемом, позволяющим сразу получить желаемый результат; Эйнштейн продемонстрировал его на венской конференции [E11].

В (13.10) положим $\Phi = c^2\ln\psi$. Тогда

$$\partial\psi/\partial x^\mu + (1/c^2)\,d(u_\mu\psi)/d\tau = 0. \qquad (13.12)$$

Это уравнение следует из вариационного принципа

$$\delta\int\psi\,d\tau_0 = 0, \qquad d\tau_0^2 = -\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu, \qquad (13.13)$$

из которого можно вывести уравнение для тензора энергии-импульса частицы с массой покоя m и объемом покоя V ($\rho = m/V$):

при этом считается, что частица непрерывно распределена по объему V:

$$T^{\mu\nu} = (\rho\psi/c^2)\,u^\mu u^\nu. \tag{13.14}$$

Выражение для дивергенции тензора энергии-импульса имеет вид

$$\partial T^{\mu\nu}/\partial x^\nu = -\rho\partial\psi/\partial x_\mu. \tag{13.15}$$

Из (13.14) следует $T^\mu_\mu \equiv T = -\rho\psi$, и, следовательно, уравнение (13.15) можно записать так:

$$\partial T^{\mu\nu}/\partial x^\nu = (T/\psi)\,\partial\psi/\partial x_\mu. \tag{13.16}$$

В нем уже нет членов, в которые входила бы масса m. Эйнштейн предложил считать, что уравнение (13.16) справедливо для любых материальных (и электромагнитных) систем, обуславливающих наличие тензора $T^{\mu\nu}$. Положим

$$-\psi\,\Box\,\psi = \varkappa T. \tag{13.17}$$

Это и есть второе уравнение поля Нордстрёма. Из (13.16) и (13.17) следует, что

$$\partial(T^{\mu\nu} + t^{\mu\nu})/\partial x^\nu = 0, \tag{13.18}$$

где

$$t^{\mu\nu} = \frac{1}{\varkappa}\left[\frac{\partial\psi}{\partial x_\mu}\frac{\partial\psi}{\partial x_\nu} - \frac{1}{2}\,\eta^{\mu\nu}\left(\frac{\partial\psi}{\partial x_\lambda}\frac{\partial\psi}{\partial x^\lambda}\right)\right] \tag{13.19}$$

— тензор энергии-импульса гравитационного поля. Таким образом, теория обладает свойством лоренц-инвариантности и удовлетворяет законам сохранения.

Обратимся теперь к принципу эквивалентности. Рассмотрим полностью замкнутую статическую систему. При интегрировании по всей системе получаем $\int T^i_i\,dx = 0$ $(i = 1, 2, 3)$. Отсюда $\int T\,dx = -E/c^2$, где E — полная энергия системы. То же соотношение верно и для системы, находящейся в статическом равновесии, при условии, что E рассматривается как среднее по времени значение для системы в целом [7]). При переходе к предельному случаю слабого статического поля имеем $\psi/c^2 = 1 + \varphi/c^2$, где φ — ньютонов потенциал. Тогда уравнение (13.17) принимает вид

$$\Delta\varphi = -\varkappa E/c^4, \tag{13.20}$$

и мы получим желаемый результат: гравитационная масса пропорциональна полной энергии системы [8]). Как позднее заметил

---

[7]) См. [L2]. Среднее должно определяться для времени, в течение которого выравниваются флуктуации давления.

[8]) Этот результат представляет собой слабый принцип эквивалентности по Дикке. Дикке в дальнейшем показал, что теория Нордстрёма не удовлетворяет сильному принципу эквивалентности, в соответствии с которым предполагается, что в невращающейся свободно падающей лабораторной системе все законы физики имеют такой же вид, как и в пространстве, в котором отсутствует поле тяготения [D1].

Эйнштейн, в этой теории принцип эквивалентности является статистическим законом [E12].

Примерно четверть прочитанного Эйнштейном в Вене доклада «К современному состоянию проблемы тяготения» посвящена работе Нордстрёма[9]). Эйнштейн лишь вкратце коснулся идей Абрагама, указав, что считает обязательным включение в любую будущую теорию СТО, а теория Абрагама не удовлетворяет этому требованию. Когда позднее в ходе дискуссии Ми заметил, что теория Нордстрёма выросла из работы Абрагама, Эйнштейн ответил: психологически — да, логически — нет. Включение принципа эквивалентности было вторым требованием, выдвинутым Эйнштейном: «В отношении [теории тяготения] опыт Этвеша играет роль, сходную с ролью опыта Майкельсона в вопросе о возможности физически обнаружить равномерное движение». На вопрос Ми, почему Эйнштейн не упомянул о его, Ми, теории, Эйнштейн ответил, что обсуждает лишь те теории, которые, в отличие от работ Ми, удовлетворяют принципу эквивалентности[10]). Основная часть доклада была, естественно, посвящена недавно законченной им работе, выполненной вместе с Гроссманом, и практически не содержит ничего нового. В Вене основным оппонентом Эйнштейна был Ми. Вскоре после окончания венской конференции Ми опубликовал еще одну работу, в которой критиковал теорию Эйнштейна [M4]. В своем ответе Эйнштейн привел частично неверные аргументы: он еще раз подчеркнул неизбежность выполнения инвариантности уравнений гравитационного поля лишь для линейных преобразований [E13].

Итак, резюмируя, можно сказать, что до 1912 г. ни одна из попыток построения теории гравитационного поля ни к чему не привела. К концу 1913 г. сложилась исключительно запутанная ситуация. Теория Нордстрёма была единственной последовательной теорией тяготения. Большинство физиков были готовы согласиться с СТО. Некоторые были не прочь отказаться от признания фундаментальной роли принципа эквивалентности, но остальные считали, что это чересчур. Видимо, никто не разделял мнения Эйнштейна о тех ограничениях, которые тяготение должно накладывать на СТО; не нашлось и желающих разрабатывать предложенную им программу построения тензорной теории тяготения. Один Лоренц поддерживал Эйнштейна. «Я очень рад, что Вы благосклонно отнеслись к результатам наших [с Гроссманом]

---

[9]) Эйнштейн также воспользовался этим случаем для того, чтобы снять возражение против скалярной теории, выдвинутое им в статье, написанной вместе с Гроссманом [E1]. Дополнительно о скалярной теории см. в [W2].

[10]) В теории Ми [M3] отношение гравитационной и инертной масс зависит от физических параметров, таких, как скорость и температура. Кроме того, из нее не следуют ни красное смещение, ни искривление лучей света. Я не обсуждаю эту сложную теорию (в ней рассматриваются два скалярных поля) из-за того, что в ней нет ничего концептуально интересного.

исследований»,— писал Эйнштейн в том же письме, в котором выражал собственные сомнения по поводу этой теории [E3].

Невзирая на сомнения, Эйнштейн был настроен по-боевому. На критику Абрагама и Ми он отвечал: «Я очень доволен, что этот вопрос, по крайней мере, вызвал должное оживление. Я обожаю противоречия. Как у Фигаро: „Коль вам угодно, граф мой, развлечься, если плясать пришла вам охота, танец веселый сыграю вам я...“» [E14]. Эйнштейн был убежден в том, что четырехмерное псевдоевклидово описание нуждается в пересмотре: «Я очень рад тому, что коллеги занимаются моей теорией, хотя бы и с намерением похоронить ее... На первый взгляд, теория Нордстрёма... гораздо правдоподобнее. Но она также построена на априорном введении евклидова четырехмерного пространства. Эта вера, по-моему, уже превращается во что-то вроде предрассудка» [E15]. В марте 1914 г. он так высказался о своей работе: «Природа показывает нам лишь хвост льва. Но я нисколько не сомневаюсь в том, что лев действительно существует, хотя из-за своего огромного размера он не может сразу появиться целиком» [E16][11]).

Портрет Эйнштейна-физика в 1913 г. весьма колоритен. Его усилия не дали существенных результатов. Он видит ограниченность того, что сделал. Он абсолютно убежден в правильности своих представлений. И совершенно одинок. Мне кажется, что интеллектуальная мощь, мужество и упорство Эйнштейна, благодаря которым он смог продолжать работу в таких обстоятельствах, а также грандиозный триумф, которого он добился несколько лет спустя, во многом объясняют, почему позднее он вновь бесстрашно занял такую же позицию, в одиночку начал поиски подхода к квантовой механике, полностью противоречащего общепринятым взглядам.

§ 13.2. Статья Эйнштейна — Фоккера

Адриан Даниэль Фоккер защитил докторскую диссертацию под руководством Лоренца в конце 1913 г. Его диссертация была посвящена броуновскому движению электронов в поле излучения [F1] и содержала уравнение, которое в дальнейшем получило наименование уравнения Фоккера — Планка. После защиты Лоренц послал Фоккера в Цюрих поработать с Эйнштейном. Их сотрудничество длилось всего лишь семестр, в результате появилась краткая статья, представляющая значительный интерес для развития ЭТО, поскольку это первая работа Эйнштейна, посвященная теории тяготения, в которой строго выполняется требование общековариантности [E18].

Сначала авторы переписали уравнение (13.13):

$$\delta \int d\tau = 0, \quad d\tau^2 = -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad g_{\mu\nu} = \psi^2 \eta_{\mu\nu}. \qquad (13.21)$$

[11]) Комментарии Эйнштейна 1914 г. по поводу теории Нордстрёма приведены в гл. 14, а его воспоминания о скалярных теориях — в [E17].

откуда сделали вывод о том, что теория Нордстрёма представляет собой частный случай теории Эйнштейна — Гроссмана, поскольку Нордстрём ввел дополнительное требование постоянства скорости света. Тем не менее, эта теория является, конечно, более общей, чем СТО. В частности, из уравнения (13.21) следует, что ни реальный темп хода переносимых часов dt, ни реальная длина dl переносимого масштаба не принимают следующих из СТО релятивистских значений dt_0 и dl_0. Вместо этого, как было уже известно Нордстрёму, $dt_0 = dt/\psi$, $dl_0 = dl/\psi$, что согласуется с независимостью скорости света от ψ.

Эта статья особо примечательна из-за нового вывода уравнения поля [см. (13.17)]. «Из математических исследований дифференциальных тензоров» следует (утверждают авторы), что уравнение поля должно иметь вид

$$R = \text{const} \cdot T, \tag{13.22}$$

где

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \tag{13.23}$$

— скаляр кривизны, полученный из тензора Риччи $R_{\mu\nu}$ [уравнение (12.20)], в котором значения $g_{\mu\nu}$ задаются (в данном случае) уравнением (13.21). Эйнштейн и Фоккер пошли дальше и доказали, что уравнение (13.22) (с соответственно подобранной константой) эквивалентно уравнению (13.17)!

Статья заканчивается следующим замечанием: «...роль, которую играет в настоящем исследовании дифференциальный тензор Римана — Кристоффеля, наводит на мысль, что можно было бы также найти способ вывода гравитационных уравнений Эйнштейна — Гроссмана, независимый от физических предположений. Доказательство существования или отсутствия связи такого рода означало бы важный теоретический прогресс». В последнем примечании говорится о том, что соображения, заставившие Эйнштейна и Гроссмана [E1] сделать вывод об отсутствии такой связи, неверны, а именно, были неправильно определены свойства тензора Риччи для слабого поля (гл. 12).

Итак, в начале 1914 г., через 50 лет после первой попытки Максвелла построить теорию гравитационного поля, Эйнштейн еще не достиг цели, но уже был к ней близок, как видно из заключительного замечания статьи Эйнштейна и Фоккера. То, что для получения окончательного результата ему понадобилось еще почти два года, частично объясняется большими переменами в его личной жизни; об этом и пойдет речь дальше.

Глава 14. УРАВНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

§ 14.1. Из Цюриха в Берлин

В 1915 г., 25 ноября Эйнштейн представил физико-математическому отделению Прусской академии наук работу, которой «...наконец [было] завершено построение общей теории относи-

тельности как логической схемы» [E1]. Называется эта работа так же, как и настоящая глава, где рассказано о том, как Эйнштейн получил уравнения поля в окончательном виде.

Когда Эйнштейн выступал с докладом на венской конференции, о чем говорилось в гл. 13, он еще был профессором Цюрихского политехникума, но уже принял решение покинуть Цюрих.

Весной 1913 г. в Цюрих приехали Планк и Нернст; целью их визита было узнать у Эйнштейна, не хочет ли он переехать в Берлин. Ему сделали сразу несколько предложений — стать членом Прусской академии наук с персональным окладом, наполовину финансируемым прусским правительством, наполовину — физико-математическим отделением из внешних фондов, профессором Берлинского университета с правом преподавания, но без обязательной учебной нагрузки, и директором будущего физического института. Новый институт организовался под эгидой «Общества им. кайзера Вильгельма», основанного в 1911 г. для финансирования фундаментальных исследований частными фондами [1]).

Спустя много лет Эйнштейн вспоминал об интересном разговоре, который состоялся у него с Планком в Цюрихе. Планк спросил его, чем он занимается, и Эйнштейн рассказал о своей работе над ОТО. Планк сказал: «Как старший товарищ я должен Вас предостеречь против продолжения этой работы. Во-первых, у Вас ничего не выйдет, а во-вторых, если Вы и добьетесь успеха, Вам все равно никто не поверит» [S1].

Эйнштейн быстро принял предложение из Берлина. Из его переписки того времени становится очевидной основная причина такого решения. Ни тогда, ни позднее он ничего не имел против обсуждений проблем физики с молодыми коллегами и студентами, но был сыт по горло преподаванием. Он хотел одного — думать. В перечне диссертаций, защищенных в политехникуме, можно найти сведения о том, что Эйнштейн выступал в качестве оппонента («сореферента» [2])) четырех соискателей; все они работали в области экспериментальной физики, диссертациями по теоретической физике он не занимался.

Воодушевленные ответом Эйнштейна Планк, Нернст, Рубенс и Варбург совместно составили и подписали особую рекомендацию, необходимую для принятия в члены Академии, которая была представлена 12 июня 1913 г. [K1, с. 95]. По этой рекомендации 3 июля физико-математическое отделение провело голосование. Результаты его были таковы: 21 — за, один — против [K1, с. 98]. Оставалось решить еще некоторые организационные во-

---

[1]) Этот физический институт начал работать в 1917 г. С 1921 г. его руководством стал заниматься М. Лауэ.

[2]) Для утверждения диссертаций по правилам политехникума требовалось официальное одобрение их как основным экзаменатором (референтом), так и вторым экзаменатором (сореферентом). Эйнштейн был сореферентом диссертаций Карла Рейгера, Ганса Репкера, Эльзы Френкель и Огюста Пикара.

просы, но уже в июле 1913 г. Эйнштейн сообщил одному из друзей о том, что собирается переехать в Берлин к весне 1914 г. [E2]. В августе он написал Лоренцу: «Сердечно благодарю Вас за дружеские поздравления в связи с получением мной новой должности. Я не смог удержаться от искушения принять это предложение, освобождающее меня от всяких обязанностей,— теперь я свободно смогу предаваться размышлениям» [E3]. На поздравления Эренфеста Эйнштейн ответил: «Я согласился на эту странную синекуру, так как преподавание действует мне на нервы, а в Берлине не нужно будет читать лекции» [E4]. Цангеру он сказал, что надеется на плодотворные контакты с коллегами в Берлине. «В частности, мне сейчас важно поддерживать контакт с астрономами» [E5]. При этом Эйнштейн, очевидно, имел в виду свой интерес к измерениям красного смещения и искривления световых лучей.

В письме [K1, с. 101], направленном в Академию 7 декабря 1913 г., Эйнштейн официально принял предложение стать ее членом и заявил о том, что намерен занять свой пост в апреле 1914 г. А 9 февраля 1914 г. выступил с прощальным докладом перед Физическим обществом Цюриха, где отметил: «...едва ли кто сможет утверждать, что в теории тяготения мы продвинулись дальше, чем физики в теории электричества в XVIII в., когда был известен только закон Кулона» [E6]. Он упомянул о теориях Нордстрёма и Эйнштейна — Гроссмана и заметил, что первая из них проще и правдоподобнее, но она не проливает свет на относительность неравномерного движения; кроме того, он выразил надежду на то, что искривление световых лучей (предсказанное теорией Эйнштейна — Гроссмана, но отсутствующее в теории Нордстрёма), если оно будет обнаружено на опыте, позволит определить, какая из теорий верна.

Семья Эйнштейна покинула Цюрих в конце марта 1914 г. Эйнштейн ненадолго заехал в Лейден, а оттуда отправился в Берлин, где ему предстояло прожить до декабря 1932 г. Жена с детьми на несколько недель съездили в Локарно [E7], а потом тоже приехали в Берлин, но ненадолго. Вскоре после приезда Милевы Эйнштейны разошлись. Я не знаю, что заставило их разойтись именно в то время, но брак нельзя было назвать счастливым. Эйнштейн никогда не пытался возложить всю вину на Милеву. Он решился на этот брак не без колебаний и в конце концов не смог выдержать совместной жизни [E7a]. Теперь Милева с мальчиками возвращалась в Цюрих. Эйнштейн провожал их на вокзал. «Он вернулся с вокзала в слезах»,— рассказывала Элен Дюкас. Сыновей он любил по-прежнему, в течение многих лет регулярно брал их с собой, когда ехал отдыхать. Общаться с ними не всегда было легко, поскольку Милева так никогда и не примирилась с разводом. Позднее, когда Эйнштейн женился снова, дети часто навещали его и жили с отцом в Берлине.

Вскоре после того, как Эйнштейны разъехались, Альберт перебрался в холостяцкую квартиру на Виттельсбахерштрассе, 13.

В начале апреля он писал Эренфесту: «Мне нравится в Берлине. Уютная комната... Я получаю большое удовольствие от общения со знакомыми, особенно с „кузиной" моего возраста, с которой меня связывает долгая дружба» [E8]. Год спустя он делился с Цангером: «В личной жизни я никогда не был так умиротворен и счастлив, как сейчас. Я веду уединенную жизнь, но не чувствую себя одиноким благодаря нежной заботе „кузины", которая, по сути, и заставила меня переехать в Берлин» [E9]. Мы еще встретимся с этой кузиной в гл. 16.

К моменту переезда в Берлин Эйнштейн уже был знаменит, хотя звездой первой величины стал лишь спустя пять лет. После его приезда редакция крупной немецкой газеты «Die Vossische Zeitung» обратилась к Эйнштейну с просьбой рассказать читателям о своей работе. Эйнштейн согласился, и 26 апреля 1914 г. была опубликована его первая газетная статья «О принципе относительности» [E10]. Она хорошо написана и в основном касается проблем СТО. В последнем ее абзаце Эйнштейн задает вопрос: «Является ли очерченная выше [специальная] теория относительности в основном законченной или же она представляет только первый шаг на пути дальнейшего развития?». Далее он отмечает, что ему представляется верным второе утверждение, но добавляет: «...по этому вопросу даже физики, ценящие теорию относительности, еще не имеют единого мнения»[3]).

С особой очевидностью различие во мнениях о будущем теории относительности, весьма характерное для периода 1913—1915 гг., проявилось во время заседания Прусской академии наук 2 июля 1914 г., где Эйнштейн выступил с докладом [E13]. Выразив благодарность: «Избранием в вашу Академию вы освободили меня от волнений и забот службы и позволили полностью посвятить себя занятиям наукой»,— он перешел к рассмотрению положения дел в физике. Он высоко отозвался о Планке, который «[квантовой] гипотезой... отверг классическую механику для случая, когда достаточно малые массы движутся с достаточно малыми скоростями и достаточно большими ускорениями» и далее заявил: «...мы должны признать, что находимся по отношению к основным законам этого движения в том же положении, в котором до Ньютона астрономы находились по отношению к законам движения планет». Затем он перешел к теории относительности и заметил, что СТО «не дает полного удовлетворения с теоретической точки зрения, потому что сформулированный... принцип относительности отдает предпочтение равномерному движению».

В ответном выступлении Планк [P1] приветствовал Эйнштейна и заметил: «Я знаю Вас достаточно хорошо и могу сказать,

---

[3]) В обзоре по теории относительности, написанном Эйнштейном в 1915 г. [E11], смысл высказываний примерно такой же. Обзор почти полностью посвящен СТО и содержит высказывания, практически идентичные цитированным выше.

что по-настоящему Вы любите то направление работы, которое позволяет личности проявить себя с наибольшей свободой». После этого он коснулся вопроса о предпочтении, отдаваемом в СТО равномерному движению. «По моему мнению, можно занять противоположную [Эйнштейну] точку зрения и рассматривать предпочтение равномерного движения как очень важную и ценную черту теории относительности». Это связано с тем, отметил Планк, что законы природы всегда предполагают наличие неких ограничений на бесконечно большое число потенциально возможных ситуаций. «Должны ли мы считать ньютонов закон притяжения неудовлетворительным из-за того, что в него входит показатель степени, равный 2?» Может быть, предпочтительность равномерного движения связана с «некоторой особенностью, которая на самом деле выделяет прямую линию из всех прочих пространственных кривых»?! Это не очень убедительные соображения, однако вполне можно понять Планка, который мягко, но справедливо укоряет Эйнштейна в том, то в ОТО не все системы отсчета равноправны, «как недавно доказал сам автор». В заключение Планк выразил надежду на то, что экспедиция, которую планировалось направить для наблюдения солнечного затмения 21 августа 1914 г., сможет предоставить необходимые данные для проверки расчетов по искривлению лучей света, проделанных (пока еще неверно) Эйнштейном. Этим надеждам не было суждено осуществиться, так как вскоре разразилась первая мировая война.

На научной деятельности Эйнштейна потрясения военных лет никак не отразились, можно даже сказать, что эти годы были самыми продуктивными и творческими за всю его жизнь. В этот период он завершил построение ОТО, нашел верные значения искривления световых лучей и смещения перигелия Меркурия, выполнил основополагающую работу по космологии и гравитационным волнам, ввел коэффициенты A и B для радиационных переходов, дал новый вывод закона излучения Планка и впервые натолкнулся на трудности с причинностью в квантовой физике. В целом за годы войны он опубликовал одну книгу и около 50 статей — результат просто поразительный, особенно если учесть, что в 1917 г. он серьезно заболел и был нездоров еще несколько лет.

Интенсивная научная деятельность не мешала Эйнштейну искренне и глубоко интересоваться трагическими событиями, происходившими вокруг него и во всем мире. Напротив, в период с 1914 по 1918 г. Эйнштейн впервые вышел на общественную арену как убежденный пацифист, человек твердых нравственных убеждений, который не боится вслух высказывать свое мнение, вне зависимости от того, как к нему отнесутся другие. В начале войны Эйнштейн вместе с другими учеными подписал «Обращение к европейцам», где ученые и художники критиковались за то, что они «отказались от намерений в дальнейшем поддержи-

вать международные отношения», содержался призыв «объединить усилия тех, кому действительно дорога европейская культура», и «стремиться к учреждению Европейской лиги» (из этого начинания ничего не вышло). Это, видимо, первый политический документ, под которым Эйнштейн поставил свою подпись. Эйнштейн также вступил в пацифистскую организацию «Лига за новое отечество»[4]). Он радовался, что многие его коллеги «были выше сложившейся обстановки и не позволили увлечь себя мутным потокам [нашего] времени»: «...Гильберт сожалеет... что не может участвовать в развитии международных контактов... Планк делает все, что в его силах, чтобы держать под контролем шовинистически настроенное большинство в Академии. Должен сказать, что в данном отношении враждующие нации стоят друг друга» [E9].

На стойкость убеждений Эйнштейна нисколько не влияла насмешливая отстраненность, с которой он всегда относился к безумствам человечества. «Я начинаю привыкать к теперешнему нездоровому ажиотажу, ибо сознательно отстраняюсь от всего, чем озабочено наше сумасшедшее общество. И в сумасшедшем доме служитель может жить спокойно. С сумасшедшими приходится считаться, ведь дом, в котором живешь, построен для них. Выбор же дома отчасти зависит от нас, хотя, впрочем, разница между всеми этими заведениями куда меньше, чем нам представляется в молодости» [E14].

Война продолжалась, и надежды Эйнштейна на то, что голос разума будет услышан, сменялись пессимизмом. В 1917 г. он писал Лоренцу: «Меня постоянно угнетают безмерно трагические события, обременяющие нашу жизнь. Раньше я спасался, погружаясь в физику, но теперь уже и это не помогает» [E15]. Думаю, что уныние могло усугубляться болезнью Эйнштейна.

После краткого отступления вернемся к разработке ОТО. Осенью 1914 г. Эйнштейн написал обширную статью для сборника трудов Прусской академии [E16]. Основная цель статьи — дать более систематическое и подробное изложение методов и результатов, полученных в первой работе, написанной совместно с Гроссманом [E17]. Примерно половина ее посвящена тензорному анализу и дифференциальной геометрии. Очевидно, Эйнштейн ощущал потребность объяснить эти методы по-своему; они были столь же новы для других физиков, как и для него. В статье по-новому рассмотрены и некоторые физические проблемы. Эйнштейн начинает с возражения против ньютонова доказательства абсолютного характера вращательного движения, которое чаще всего иллюстрируется приведенным Ньютоном примером с вращающимся ведром, наполненным водой (см., например, [W1, с. 16]). Он подчеркивает, что «мы не имеем средств отли-

[4]) Подробно политическая деятельность Эйнштейна в период первой мировой войны описана в книге Отто Натана и Хайнца Нордена «Эйнштейн о мире» [N1]. Отрывки из «Обращения» взяты из этой книги, где его текст приведен целиком.

чить „поле центробежных сил“ от поля тяжести... Отсюда следует, что мы имеем все основания рассматривать... поле центробежных сил как некоторое гравитационное поле». В статье сделан еще один шаг вперед — впервые Эйнштейн получил уравнение движения по геодезической для материальной точки [см. (12.28)] [E16, с. 1046, (23b)] и показал, что оно в предельном случае имеет корректный ньютонов предел [см. (12.30)] [E16, с. 1083, (88)]. Кроме того, он показал, что полученные ранее выражения для красного смещения и искривления световых лучей (где по-прежнему отсутствует множитель 2) следуют из его тензорной теории [E16, с. 1084]. Наконец, Эйнштейн, насколько мне известно, впервые сделал важное замечание о характеристиках пространства-времени: «...согласно нашей теории, пространству не придается самостоятельного физического качества» [E16, с. 1085].

Эйнштейну, однако, не удалось продвинуться дальше в вопросе ковариантности уравнений гравитационного поля. Можно даже сказать, что ситуация несколько осложнилась.

В § 12.4 я рассказал, что в начале 1913 г. Эйнштейну и Гроссману не удалось найти общековариантные уравнения гравитационного поля [E17] и Эйнштейн, чтобы объяснить невозможность добиться общей ковариантности, привел свой «физический довод». В конце 1914 г. он воспроизвел этот довод в более пространной статье. Эйнштейн не только по-прежнему верил в его справедливость, но даже предпослал ему замечание о том, что «это требование [общековариантности] необходимо несколько ограничить, если мы хотим полностью удовлетворить принципу причинности» [E16, с. 1066]. Такое замечание вполне понятно, если вспомнить об ошибочном убеждении Эйнштейна, будто значение метрического тензора $g_{\mu\nu}$ должно единственным образом определяться его источником — тензором энергии-импульса. В работе 1914 г. он вновь рассмотрел две области пространства-времени L_1 и L_2, о чем уже упоминалось в § 12.4. Напомним, что для области L_2, где нет вещества, Эйнштейн получил $g_{\mu\nu} \neq g_{\mu\nu}$. Теперь он записал это неравенство более подробно: $g_{\mu\nu}(x) \neq g'_{\mu\nu}(x')$, но добавил $g'_{\mu\nu}(x') = g'_{\mu\nu}(x'(x)) \equiv f_{\mu\nu}(x)$. У тех, кто знаком с тензорными полями, не вызовет удивления тот факт, что $g_{\mu\nu}(x) \neq f_{\mu\nu}(x)$. Эйнштейн же из этого неравенства сделал вывод о том, что уравнения гравитационного поля не должны быть общековариантными. В 1914 г. Эйнштейн не только неверно представлял себе часть проблем, связанных с причинностью, но, кроме того, еще не знал некоторых элементарных математических свойств тензоров [H1]. Он вновь подчеркнул, что уравнения гравитационного поля могут быть ковариантны лишь относительно линейных преобразований [5]).

[5]) Некоторое расширение множества допустимых преобразований, о чем говорится во второй статье Эйнштейна и Гроссмана [E18] (§ 12.4), было видимо, обнаружено вскоре после публикации работы 1914 г.

Далее Эйнштейн показал, что это требование ограниченной ковариантности позволяет единственным образом определить гравитационный лагранжиан при условии, что он однороден и имеет второй порядок относительно (обыкновенных, нековариантных) первых производных тензора $g_{\mu\nu}$ [E16, с. 1075, (78)]. Однако уже в 1915 г. он осознал, что такой «подход к определению оператора Лагранжа для гравитационного поля был полностью иллюзорен, поскольку легко изменить его таким образом, чтобы [лагранжиан] мог выбираться совершенно свободно» [E19].

Математические выкладки в октябрьской статье 1914 г. не представляют интереса для разработки ОТО и будут поэтому опущены. Публикация этой работы вызвала в начале 1915 г. переписку между Эйнштейном и Леви-Чивитой, в ходе которой итальянский математик указал на некоторые технические ошибки, допущенные в статье. Эйнштейн выразил ему свою признательность, но больше всего его порадовало то, что наконец нашелся профессиональный математик, проявивший неподдельный интерес к его работе. «Поразительно, насколько мало мои коллеги ощущают внутреннюю потребность в *настоящей* теории относительности... Поэтому было бы вдвойне приятно получше познакомиться с таким человеком, как Вы» [E20].

Итак, оглянувшись назад в конце 1914 г., Эйнштейн увидел бы, какие значительные перемены произошли в его личной жизни и научной деятельности. Но по-прежнему никто не разделял его представлений о будущей теории относительности, а сам он недостаточно четко понимал некоторые из принципиально важных ее аспектов. Через год он исправил свои концептуальные ошибки, закончил разработку теории и стал свидетелем активного участия других ученых в ее дальнейшем развитии.

§ 14.2. Интерлюдия: вращающий момент, вызываемый намагничиванием

«Я твердо убежден, что выбранное направление в принципе верно и что позднее [люди] будут удивляться тому большому сопротивлению, которое сейчас оказывается идее создания общей теории относительности» [E21]. Это пророчество было сделано Эйнштейном в первую неделю 1915 г. Ему было суждено исполниться еще до конца этого года, но лишь после того, как Эйнштейн преодолел кризис, за которым последовал период изнурительного труда. К осени 1915 г. Эйнштейн, наконец, понял, что до сих пор его теория была в ряде аспектов неверной (§ 14.3).

А пока, в начале 1915 г. Эйнштейн не опубликовал ничего нового по теории относительности[6]). Правда, вышли в свет два

---

[6]) Иногда неверно утверждают, будто в кратком резюме выступления Эйнштейна перед Прусской академией [E22] содержится заявление об окончательной формулировке теории относительности в том виде, в каком она была опубликована в ноябре 1915 г. (см., например, [D1]).

его обзора (один, посвященный теории относительности [E11], а второй — атомной теории строения вещества [E11a]) и короткая статья о статистических свойствах электромагнитного излучения, находящегося в тепловом равновесии с веществом [E23]. Больший интерес представляет его деятельность в области экспериментальной физики. Эйнштейн не упустил представившейся ему возможности поработать в качестве приглашенного сотрудника в Физико-техническом институте Шарлоттенбурга [K1, с. 50]. «На старости лет меня начинает одолевать страсть к экспериментальной работе» [E24]. Плодом этой страсти стало открытие эффекта Эйнштейна — де Хааза, при котором подвешенный цилиндр (например, железный) в результате быстрого намагничивания приобретает механический момент. В данном параграфе будет кратко рассказано об истории этого открытия.

Вандер Йоханнес де Хааз был голландским физиком примерно одного возраста с Эйнштейном. Докторскую диссертацию защитил в 1912 г. в Лейдене под руководством Камерлинг-Оннеса. В том же году он приехал в Берлинский университет, чтобы поработать в лаборатории Анри дю Буа[7]). Когда в августе 1913 г. Лоренц направил поздравления Эйнштейну по поводу предстоящего переезда в Берлин, он, видимо (письмо утрачено), справлялся у Эйнштейна, не может ли тот сделать что-либо для де Хааза, о чем свидетельствует ответ Эйнштейна: «Пока я не знаю, чем могу помочь Вашему зятю, поскольку в Берлине у меня не будет ни института, ни ассистента» [3]. Вскоре Эйнштейн был приглашен поработать в Шарлоттенбурге и, таким образом, мог кое-что сделать для де Хааза, а значит — для Лоренца[8]). Я не знаю, когда де Хааз приехал к Эйнштейну в Шарлоттенбург, однако известно, что их гиромагнитный эксперимент был выполнен «в очень короткий срок» [H1a]. Де Хааз уехал из Шарлоттенбурга в апреле 1915 г.

Результаты совместной работы воодушевили Эйнштейна: «В этом семестре я выполнил с зятем Лоренца прекрасный, с научной точки зрения, эксперимент. Мы надежно доказали существование молекулярных токов Ампера[9]) (объяснение пара- и ферромагнетизма)... В пределах погрешностей эксперимента (около 10 %) теория подтверждена во всех деталях» [E14][10]). Опыт Эйнштейна — де Хааза, простой по замыслу, но сложный в исполнении, позволил впервые доказать наличие вращающего

---

[7]) В октябре 1912 г. по предложению Лоренца супруги Эренфесты посетили де Хааза с женой в Берлине [K2].

[8]) В одной из работ Эйнштейн назвал де Хааза де Хаазом-Лоренцем [E25].

[9]) Около 1820 г. Андре Мари Ампер высказал предположение о том, что магнетизм может вызываться кольцевыми токами.

[10]) Имеются немецкий [E26], голландский [E27] и английский [E28] варианты этой статьи. Каждый из них слегка отличается от двух других. Утверждение о пределах погрешностей измерений в каждой из статей в принципе соответствует процитированной выдержке из письма. Все три статьи были опубликованы в 1915 г.

момента, вызываемого намагничиванием. Качественно полученный результат был верен, однако в «доспиновые» времена любая динамическая теория ферромагнетизма была обречена на неудачу. Эйнштейн не мог знать, что в полученном им теоретически выражении недоставало множителя, равного 2. Поскольку Эйнштейн и де Хааз утверждали, будто теория в целом соответствует эксперименту, полученный экспериментально результат также, очевидно, неверен. Оценка предела погрешностей измерений 10 % была чересчур оптимистичной. Как мы увидим далее, согласие, якобы существовавшее между теорией и экспериментом, было следствием своего рода теоретического предрассудка.

Весьма характерно, что Эйнштейн ничего не знал о том, что до него уже пытались измерить гиромагнитные эффекты [E26]. Еще Максвелл отмечал в трактате 1873 г.: «...пока нет экспериментальных свидетельств того, что электрический ток действительно является потоком материальной субстанции» [M1]. Он предложил и несколько способов проверки такого представления: обнаружить, наводится ли ток при ускорении проводника[11]), и проверить, возникает ли гиромагнитный момент, в чем, собственно, и состоит суть эффекта Эйнштейна — де Хааза [M2]. В 1861 г. Максвелл сам пытался обнаружить такие гиромагнитные эффекты, но безуспешно.

Необходимо упомянуть и о двух смежных работах, выполненных до 1915 г.[12]). Теоретический результат, который Эйнштейн получил в 1915 г., был уже получен в Палмеровской лаборатории в Принстоне [R1][13]). В 1909 г. Самьюэл Барнетт из университета Тьюлейн в Нью-Орлеане начал изучать обратный эффект: намагничивание, возникающее в результате вращения,— известный сейчас как эффект Барнетта. Далее я расскажу о работе Эйнштейна и де Хааза и об интересных результатах, полученных примерно в то время Барнеттом [B2].

Сформулируем сначала на современном языке гипотезу Ампера[14]). Магнитный момент **M** намагниченного тела (предполагается, что оно находится в покое) связан с циркуляцией «скрытых электрических токов». Этот скрытый ток вызывается скрытым движением заряженного вещества (электронов), движущегося по замкнутым траекториям. Таким образом, имеется скрытый момент импульса **J**, связанный с **M** следующим выражением:

$$\mathbf{M} = -(e/2mc)\,g\mathbf{J}, \qquad (14.1)$$

где $-e$ и m — соответственно заряд и масса электрона. Фактор магнитного расщепления g называют сейчас множителем Ландо

---

[11]) Этот эффект впервые наблюдался в 1916 г. [T1].

[12]) Подробно об истории первых экспериментов по обнаружению гиромагнитных эффектов рассказано в работах Барнетта [B1].

[13]) В течение некоторого времени после 1915 г. этот эффект называли эффектом Эйнштейна — Ричардсона.

[14]) В статье Эйнштейна и де Хааза и других ранних работах магнитный момент обозначали cM.

($g > 0$ для пара- и ферромагнитных веществ). В модели Ричардсона и Эйнштейна значение

$$g = 1 \qquad (14.2)$$

было получено, исходя из следующих соображений. Рассмотрим единичный электрон, движущийся по круговой орбите радиуса r с постоянной скоростью v и круговой частотой ν. Тогда $v = 2\pi r\nu$. Момент импульса составляет $mvr = 2\pi r^2 m\nu$. Через любую точку орбиты каждую секунду проходит количество электричества, равное $-e\nu$. Поэтому магнитный момент равен $-e\nu\pi r^2/c$. Отсюда следует, что $g = 1$. Утверждалось, что фактор g имеет такое же значение и для ферромагнитных и парамагнитных веществ, если считать, что магнетизм вызывается электронами, движущимися независимо друг от друга по круговым орбитам.

Эйнштейн и де Хааз прекрасно знали о возражениях, которые можно выдвинуть против такого вывода. «Одно из них даже более серьезно, чем те, которые выдвигались во времена Ампера... Циркулирующие электроны должны постоянно терять энергию за счет излучения... поэтому намагниченное тело должно было бы терять свой магнитный момент. На самом деле этого не происходит, откуда следует, что гипотеза Ампера, видимо, не совместима с фундаментальными законами электромагнетизма. Представляется, что доводы за и против гипотезы Ампера тем самым взаимно уравновешиваются, и данная проблема затрагивает важные принципиальные вопросы физики» [E28]. Эти слова со всей определенностью показывают, что для Эйнштейна доказательство существования постоянно циркулирующих электронов значило гораздо больше, чем просто проверка гипотезы столетней давности [15]). Так же важно это было и для Бора, чьей теории стационарных атомных орбит к тому времени исполнилось всего два года. Для Бора результат эксперимента Эйнштейна — де Хааза означал подтверждение его собственных идей. Позднее, в 1915 г., он писал: «Как показано Эйнштейном и де Хаазом, из [их] эксперимента со всей определенностью следует, что электроны могут вращаться в атомах, не излучая» [B3] [16]).

Методика эксперимента Эйнштейна — де Хааза при определении значения g-фактора заключалась в исследовании движения вертикально подвешенного железного цилиндра (за положительное направление по вертикальной оси z принималось направле-

---

[15]) Была еще одна причина, по которой Эйнштейн придавал столь большое значение эффекту Эйнштейна — де Хааза, что особенно заметно в его работе, написанной в мае 1915 г. [E25]: он (ошибочно) считал, что сохранение ферромагнитных свойств при абсолютном нуле указывает на наличие некой энергии вращения даже при абсолютном нуле. (В 1913 г., пытаясь объяснить некоторые аномалии значений удельной теплоемкости двухатомных молекул, он высказал гипотезу о существовании такой энергии при абсолютном нуле [E12]. Однако к 1915 г. он уже убедился в неверности такого подхода к объяснению удельной теплоемкости [F1].)

[16]) Ни в одной из статей Эйнштейна и де Хааза квантовая теория, однако, не упоминается.

ние снизу вверх). Вокруг цилиндра коаксиально ему помещался закрепленный соленоид. В результате пропускания по соленоиду переменного тока железный цилиндр намагничивался. Изменение магнитного момента ΔM в направлении z вызывает изменение скрытого момента импульса, связанного с движением электронов, на величину ΔJ, т. е. $\Delta M = -eg\Delta J/2mc$. Из закона сохранения момента импульса следует, что изменение ΔJ должно компенсироваться поворотом цилиндра, т. е. железный цилиндр в целом приобретает момент импульса $-\Delta J$, поскольку он может считаться твердым. Если на цилиндр действует только магнитная сила, то результирующая угловая скорость $\Delta\alpha$ задается выражением $egQ\,\Delta\alpha = 2mc\,\Delta M$ (Q — момент инерции в направлении оси z). В действительности $\Delta\alpha$ есть результат сложения магнитной силы, приводящей цилиндр во вращение, и возвращающей силы, действующей со стороны подвеса. Очевидно, что эксперимент позволяет определить g-фактор в том случае, когда известны прочие магнитные и механические параметры.

Эксперимент совсем не прост: цилиндр должен быть подвешен точно по оси; магнитное поле должно быть строго симметрично относительно оси цилиндра и однородно, для того чтобы ΔM имело простой смысл; необходимо компенсировать магнитное поле Земли; возможны побочные эффекты, связанные со взаимным влиянием переменного тока и остаточной намагниченности цилиндра. Поэтому нет ничего удивительного в том, что «цилиндр совершает самые неожиданные движения» [E26]. Эйнштейн и де Хааз показали, что большую часть этих трудностей можно преодолеть при помощи оригинального приема — резонансного метода. Цилиндр подвешивают на довольно жесткой стеклянной нити. Затем добиваются совпадения частоты механических колебаний системы с частотой переменного тока; результирующий резонанс позволяет отделить изучаемый эффект от посторонних влияний [17]).

Эйнштейн и де Хааз выполнили две серии измерений. Они добились согласия с рассчитанным ими значением $g = 1$, выбрав одну из двух серий. Через шесть лет, когда стало ясно, что значение $g = 1$ неверно, де Хааз рассказал [18]): «Значения, которые мы получили [для g], были равны 1,45 и 1,02. Второе значение почти равно классическому значению $g = 1$, поэтому мы решили, что первое значение оказалось слишком большим из-за погрешностей эксперимента... Мы не измеряли поле соленоида, а рассчитывали его... Мы также не измеряли намагниченность цилиндра, а рассчитывали или оценивали ее. Обо всем этом говорится в статье. Полученные предварительные результаты показались нам удовлетворительными, и легко понять, почему мы

---

[17]) Дополнительная информация была получена путем измерений не только в режиме резонанса, но и вблизи него. Многие технические подробности, не обсуждавшиеся здесь, можно найти в статье Барнетта 1935 г. [B1].

[18]) Я здесь несколько изменяю формулировки де Хааза.

сочли значение 1,02 более подходящим...» [H1a]. Я не знаю, делал ли такие признания и Эйнштейн.

Этот параграф был бы неполон без рассказа о переходе к современному периоду. Теперь известно, что ферромагнетизм практически полностью вызывается наличием спина. Вклад орбитального момента (объяснение, дававшееся ранее) оказался почти неощутимым. Квантовомеханическая теория ферромагнетизма, разработанная в 1928 г. Гейзенбергом [H1b], позволила более детально рассмотреть соответствующие гиромагнитные эффекты [H2]. В ходе экспериментов было установлено, что значение g-фактора для ферромагнитных веществ (за исключением Fe_7S_8) близко к двум с отклонением менее 10 % [S2]. Первые экспериментальные результаты, указывающие на то, что $g \approx 2$, были опубликованы в 1915 г. Барнеттом, работавшим тогда в университете штата Огайо. В работе об эффекте, носящем его имя [B2], он сделал вывод о том, что «в пределах погрешностей измерения значение g... вдвое больше рассчитанного», т. е. равного единице. Однако в ходе дальнейших измерений, выполненных в 1917 г., он получил значение $g \approx 1$, но сделал оговорку: «...погрешности эксперимента настолько велики, что по моему мнению не следует придавать слишком большого значения расхождению с полученными ранее результатами» [B4]. В период с 1918 по 1920 г. были опубликованы результаты трех независимых измерений эффекта Эйнштейна — де Хааза. Работы (в хронологическом порядке) были выполнены в Принстоне [S3], в Цюрихском политехникуме [B5] и в Упсале [A1]; соответственно, были получены следующие значения: 1,96; 1,88 и 1,87. С этого момента было твердо установлено наличие «гиромагнитной аномалии», как часто называют этот эффект. Понятно, что за этим последовали довольно широко распространенные предположения о «планетарных движениях [положительно заряженных] составляющих ядра» [B6]. Первым заподозрил наличие связи между аномальным эффектом Зеемана и этой новой гиромагнитной аномалией Альфред Ланде [L1], опубликовавший на эту тему статью в 1921 г., тогда же, когда Гейзенберг в письме Паули высказал предположение о том, что значение $g = 2$ может выполняться лишь для ферромагнетиков [H3].

Поскольку де Хааз работал в Лейдене, где был открыт спин, естественно было задать Уленбеку вопрос о том, сыграл ли какую-либо роль эффект Эйнштейна — де Хааза в открытии им и Гаудсмитом спина электронов (я задал этот вопрос, так как в их статье об эффекте Эйнштейна — де Хааза ничего не говорилось). Уленбек ответил, что он слышал об этом эффекте, так как работал в Лейдене, но в то время данная проблема не находилась в центре внимания. «Если бы Эренфест счел необходимым, то он, несомненно, напомнил бы нам об этом эффекте». Таким образом, эффект Эйнштейна — де Хааза не стимулировал проведение дальнейших исследований, а скорее подтвердил полученные в их ходе результаты.

Эйнштейн продолжал интересоваться гиромагнитными эффектами и после отъезда де Хааза. В 1916 г. он опубликовал еще одну работу об эффекте Эйнштейна — де Хааза, в которой описана новая экспериментальная установка для определения значения g-фактора[19]) [E37]. Эйнштейна по-прежнему интересовала деятельность физико-технического института, в 1916 г. он был назначен членом институтского совета управляющих и принимал активное участие в планировании и подготовке экспериментальных исследований [K1, с. 50].

А теперь вернемся к нашей основной теме — рассказу о том, как Эйнштейн в конце концов пришел к формулировке своей общей теории относительности.

§ 14.3. Завершающие шаги

Кризис. Когда дело уже было сделано, 1 января 1916 г. Эйнштейн написал Лоренцу: «Прошлая осень была для меня трудным временем: я стал все яснее понимать непригодность старых уравнений гравитационного поля» [E19]. Похоже, что кризис назрел в период между концом июля и началом октября 1915 г. Это видно из письма Цангеру от 7 июля 1915 г., где говорится о лекции, недавно прочитанной им в Геттингене: «Сейчас с теорией тяготения все стало ясно» [E9]. Через неделю он сообщил Зоммерфельду о намерении написать краткую работу, в основном посвященную ОТО [E31]. Но 7 ноября написал Гильберту: «Недели четыре назад я понял, что мои прежние доказательства неверны» [E32]; в письме Лоренцу от 12 октября говорится: «В статье [написанной в октябре 1914 г. [E16]] я безответственно ввел предположение о том, что [гравитационный лагранжиан] инвариантен относительно линейных преобразований» [E33]. Эйнштейн отказался от требования линейной инвариантности в серии ноябрьских статей 1915 г., кульминацией которых стало получение 25 ноября уравнений гравитационного поля в окончательном виде. И вот 28 ноября он признался Зоммерфельду: «Истекший месяц был самым волнующим, но и самым удачным месяцем в моей жизни» [E34]. Все эти высказывания убеждают меня в том, что Эйнштейн верил в «старую» теорию до июля 1915 г.; между июлем и октябрем он нашел возражения против нее; окончательный ее вариант был разработан между концом октября и 25 ноября. В декабре он с гордостью писал о своей вере в старый вариант теории: «Этот Эйнштейн вытворяет что хочет. Каждый год он отрекается от того, что написал за год до этого...» [E35].

---

[19]) Идея состоит в изменении знака остаточной намагниченности предварительно намагниченного железного цилиндра. Преимуществом данного метода является то, что цилиндр подвергается воздействию магнитного поля в течение очень короткого времени (около 10^{-3} с), вследствие чего удается значительно уменьшить влияние посторонних эффектов.

Что же заставило Эйнштейна в период между июлем и октябрем переменить мнение? Из писем Зоммерфельду [Е34] и Лоренцу [Е19] видно, что он нашел минимум три возражения против старого варианта своей теории: 1) ограниченная ковариантность не включала в себя равномерное вращение, 2) смещение перигелия Меркурия получалось вдвое меньше наблюдаемого и 3) полученное в октябре 1914 г. доказательство единственности гравитационного лагранжиана оказалось неверным. В четырех вышедших друг за другом статьях Эйнштейн избавился от всех этих затруднений и констатировал: «К сожалению, в трудах Академии я обессмертил свои последние ошибки, допущенные в ходе борьбы за теорию» [Е34].

Четвертое ноября. Эйнштейн изложил на пленарном заседании Прусской академии наук новый вариант ОТО, «основанный на постулате ковариантности всех систем уравнений относительно преобразований с определителем 1» [Е36]. В начале своего выступления он сказал о том, что «полностью потерял доверие» к уравнениям, предложенным в октябре 1914 г. [Е16], когда он дал доказательство единственности гравитационного лагранжиана. Позднее Эйнштейн понял, что это доказательство «было основано на заблуждении», и, продолжил он, «я вернулся к требованию более общей ковариантности уравнений поля, от которой отказался с тяжелым сердцем, когда работал вместе с моим другом Гроссманом». (Следует отметить, что когда дело касалось науки, ощущение тяжести на сердце проходило у Эйнштейна довольно быстро.)

Еще раз напомню: Эйнштейн и Гроссман [Е17] пришли к выводу о том, что уравнения гравитационного поля могут быть инвариантными лишь относительно линейных преобразований, и обоснование такого ограничения, данное Эйнштейном, предусматривало возможность определить $g_{\mu\nu}$ из уравнений гравитационного поля единственным образом; это обстоятельство он подчеркивал и в октябре 1914 г. [Е16]. В своей новой статье [Е36] Эйнштейн, наконец, освободился от этого предрассудка трехлетней давности, что и было основным достижением работы от 4 ноября. Полученные результаты были еще не совсем верны; оставалась неразрешенной еще одна, менее значительная, трудность, с которой он справится через три недели. Но дорога к успеху открылась, и Эйнштейн был настроен весьма лирически: «Прелесть этой теории едва ли может скрыться от того, кто действительно понимает ее».

Последней трудностью было ограничение возможных преобразований лишь унимодулярными. Как мне кажется, причины, по которым Эйнштейн ввел такое ограничение, не были принципиальными. Он просто заметил, что такой ограниченный класс преобразований позволял упростить операции над тензорами. В основном это объясняется тем, что $\sqrt{g}$ представляет собой скаляр относительно унимодулярных преобразований [см. уравнение (12.14)], поэтому отсутствуют различия между тензорами и тензорными плотностями. В результате можно *переопределить* операцию ковариантного дифференцирования для тензоров с рангом

выше единицы. Например, вместо уравнения (12.13) можно использовать [E37]

$$T^{\mu\nu}_{;\mu} = \partial T^{\mu\nu}/\partial x^{\mu} + \Gamma^{\nu}_{\mu\lambda} T^{\mu\lambda}. \tag{14.3}$$

Аналогично упрощается и уравнение (12.17). «Наиболее значительным упрощениям» подвергается тензор Риччи, задаваемый уравнением (12.20). Запишем [20])

$$R_{\mu\nu} = r_{\mu\nu} + s_{\mu\nu}, \tag{14.4}$$

$$r_{\mu\nu} = -\partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}/\partial x^{\lambda} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\alpha}, \tag{14.5}$$

$$s_{\mu\nu} = \partial v_{\mu}/\partial x^{\nu} - \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} v_{\alpha}, \tag{14.6}$$

где [W1, с. 107]

$$v_{\mu} \equiv \Gamma^{\lambda}_{\lambda\mu} = \frac{\partial}{\partial x^{\mu}} \ln \sqrt{g} \tag{14.7}$$

— вектор, так как $\sqrt{g}$ — скаляр, $s_{\mu\nu}$ — ковариантная производная от v_{μ}. Следовательно, при унимодулярном преобразовании $R_{\mu\nu}$ распадается на части $r_{\mu\nu}$ и $s_{\mu\nu}$, каждая из которых по отдельности является тензором.

Рассмотрев расщепление тензора Риччи, Эйнштейн предложил предпоследний вариант уравнений гравитационного поля:

$$r_{\mu\nu} = -\varkappa T_{\mu\nu}, \tag{14.8}$$

ковариантных относительно локальных унимодулярных преобразований. Они гораздо совершеннее уравнений Эйнштейна — Гроссмана, поскольку позволяют устранить одно из замеченных Эйнштейном затруднений — в унимодулярные преобразования входят и вращения с произвольно меняющейся угловой скоростью. Кроме того, Эйнштейн доказал, что уравнение (14.8) можно получить из вариационного принципа, что выполняются законы сохранения [при этом принимается во внимание уравнение (14.3) в упрощенном виде] и что

$$\frac{\partial}{\partial x^{\alpha}}\left(g^{\alpha\beta}\frac{\partial \ln \sqrt{g}}{\partial x^{\beta}}\right) = -\varkappa T, \tag{14.9}$$

где T — след тензора $T_{\mu\nu}$. Он истолковал это уравнение как ограничение, накладываемое на $g_{\mu\nu}$. Через неделю он вернулся к этому соотношению.

В предельном случае слабого поля $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ [см. (12.29)] закон Ньютона следует из уравнения (14.8). Доказательство этого последнего утверждения — наиболее важный раздел работы. «Для определения [координатной системы] необходимо задать еще четыре уравнения. *Поэтому мы можем ... положить произволь-*

---

[20]) В [E36] Эйнштейн использовал обозначения $G_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$, $S_{\mu\nu}$; здесь им соответствуют обозначения $R_{\mu\nu}$, $r_{\mu\nu}$, $s_{\mu\nu}$.

по[21]) [курсив мой.— *А. П.*]

$$\partial h^{\mu\nu}/\partial x^{\nu} = 0.» \qquad (14.10)$$

Далее, из (14.8) и (14.10) следует

$$\Box h_{\mu\nu} = 2\varkappa T_{\mu\nu}. \qquad (14.11)$$

В предельном статическом случае это выражение сводится к уравнению Ньютона — Пуассона.

Выделенная курсивом фраза Эйнштейна ясно показывает, насколько лучше он стал разбираться в проблемах общей ковариантности. Уравнения гравитационного поля *не определяют* значения $h_{\mu\nu}$ (а значит, и $g_{\mu\nu}$) единственным образом. Однако это *не противоречит* причинности. Свобода *выбора* системы отсчета объясняется тем простым фактом, что она не имеет объективного содержания. Эйнштейн не говорил об этом в своей статье, но вскоре написал Эренфесту: «Представление о вынужденности [моих ранних соображений, касавшихся причинности] исчезнет, если понять, что ... система отсчета не обладает реальностью» [E35].

Одиннадцатое ноября. Эйнштейн сделал шаг назад. Через неделю в работе [E38] он предложил программу еще более жесткую. Уравнения должны быть инвариантны не только относительно унимодулярных преобразований (откуда следует, что g — скалярное поле), но и, что является более сильным утверждением, они должны удовлетворять выражению

$$\sqrt{g} = 1. \qquad (14.12)$$

Эйнштейн записал уравнения гравитационного поля в виде

$$R_{\mu\nu} = -\varkappa T_{\mu\nu}, \qquad (14.13)$$

где $R_{\mu\nu}$ — полный тензор Риччи. Однако из (14.7) и (14.12) следует, что $s_{\mu\nu} = 0$. Таким образом, уравнения (14.4) и (14.13) вновь приводят к (14.8), т. е. к уравнениям гравитационного поля, полученным в статье от 4 ноября.

Не обладая привлекательностью, эта идея кажется довольно простой. На самом деле она безумна. Из уравнений (14.12) и (14.9) следует, что $T = 0$. След тензора энергии-импульса становится равным нулю для электромагнитных полей, но не для вещества. Это приводит к явному противоречию, которое Эйнштейн предложил устранить, вводя «гипотезу [о том], что молекулярные гравитационные поля являются существенной составной частью материи». След плотности, который мы «видим» в веществе, по мнению Эйнштейна, следует рассматривать как сумму T, в которую в качестве слагаемых входят T' и след электромагнитного поля. Тогда T' может быть положительным даже при $T = 0$. «В дальнейшем мы предположим, что условие [$T = 0$] действительно выполняется всегда».

---

[21]) Уравнение (14.10) представляет собой координатное условие для предельного случая слабого поля [W1, с. 163].

В течение следующих двух недель Эйнштейн считал, что новое уравнение (14.12) позволило ему ближе подойти к общековариантности. Об этом он писал Гильберту 12 ноября: «Тем временем удалось продвинуться еще на шаг в решении моей проблемы. Конкретно, постулирование выражения $\sqrt{g} = 1$ подкрепляет *общую* ковариантность; из тензора Римана непосредственно следуют уравнения гравитационного поля. Если внесенное мной сейчас изменение... оправдано, то тяготение должно играть фундаментальную роль в структуре материи. Я сгораю от любопытства, оно даже мешает работать!» [E39].

Неделей позже он замечает, что против уравнения (14.12) «нет принципиальных возражений» [E40]. Спустя еще две недели Эйнштейн заявляет: «Мое мнение, высказанное недавно в этой связи, было ... ошибочным» [E1].

Восемнадцатое ноября. Эйнштейн по-прежнему настаивал на унимодулярной ковариантности и условии $\sqrt{g} = 1$. На основе «самой радикальной теории относительности» он сделал два крупнейших открытия [E40], каждое из которых изменило его жизнь.

Первым результатом явилось то, что теория «...количественно объясняет открытое Леверье вековое вращение орбиты Меркурия... При этом нет необходимости делать какие-либо предположения». Пожалуй, ни одно из событий в научной деятельности, да и в жизни, не потрясло Эйнштейна сильнее, чем это открытие. С ним говорила сама Природа. Он не мог ошибиться. «В течение нескольких дней я был вне себя от радости» [E41]. Позднее он признался Фоккеру, что это открытие вызвало у него учащенное сердцебиение [F2]. Еще примечательнее то, что он сказал де Хаазу [F2]: когда он понял, что расчеты соответствуют необъяснимым ранее результатам астрономических наблюдений, ему показалось, что внутри у него что-то оборвалось...

Открытие Эйнштейна позволило устранить затруднение, о существовании которого было известно более 60 лет. Урбен Жан Жозеф Леверье первым обнаружил аномалии в орбитальном движении Меркурия и первым же попытался их объяснить. В 1859 г., 12 сентября он представил в Парижскую академию наук текст письма Эрве Фаю, в котором описал результаты своих наблюдений [L2]. Перигелий Меркурия смещается на 38″ за столетие из-за «некоторого неизвестного пока влияния, на природу которого еще не пролит свет... Эта важная задача достойна внимания астрономов». Леверье указал, что единственное объяснение, которое он может предложить, сводится к увеличению массы Венеры минимум на 10 %, что, естественно, неприемлемо. Леверье высказывал серьезные сомнения относительно существования не наблюдавшейся до сих пор планеты, находящейся между Меркурием и Солнцем, однако не исключал возможности наличия в этой области роя астероидов. «Такова, мой дорогой коллега, новая трудность, с которой мы сталкиваемся в окрестности Солнца».

Прецессия перигелия Меркурия и других небесных тел (см., например, таблицу в [W1, с. 198]) является предметом исследований с 1850 г. по настоящее время[22]). Значение 43″, полученное для Меркурия в 1882 г. Саймоном Ньюкомом [N1a], осталось неизменным. Наиболее точное известное на сегодня значение равно $(43{,}11 \pm 0{,}45)''$ [W1, с. 198]. В своей работе от 18 ноября 1915 г. Эйнштейн привел значение[23]) $(45 \pm 5)''$ [E40].

В конце XIX — начало XX в. предпринимались многочисленные попытки теоретически объяснить аномалии движения Меркурия. Вновь рассматривалось предположение Леверье о существовании между Меркурием и Солнцем планеты[24]) или планетарного кольца. Предполагалось также наличие у Меркурия спутника (тоже до сих пор не наблюдавшегося), влияние межпланетной пыли или сплющенности Солнца [O1, гл. 4; F3]. У каждого из этих предположений были в свое время сторонники, но ни одно из них так и не стало общепринятым. Во всех них подразумевалось, что строго выполняется закон тяготения Ньютона, однако предлагался также ряд объяснений, в которых предполагались отклонения от закона Ньютона. Напомним, что и сам Ньютон уже знал о том, что даже незначительные отклонения от закона обратной пропорциональности $1/r^2$ повлекут за собой вековые возмущения орбит планет [N2]. Рассматривались два варианта изменения закона Ньютона — несколько видоизмененный чисто статический закон [O1, гл. 5], или же введение в выражение $1/r^2$ членов, зависящих от скорости [Z1]. (Упоминавшаяся в гл. 13 теория тяготения Лоренца принадлежит к последней категории.) Все эти попытки либо окончились неудачей, либо не представляют интереса из-за того, что в них входят произвольно определяемые параметры. Несмотря на все попытки найти объяснение, аномалия оставалась загадкой. В конце жизни Ньюком склонялся к тому, чтобы «временно принять гипотезу о том, что притяжение Солнца не вполне точно обратно пропорционально квадрату расстояния» [N3][25]).

Помня обо всех безуспешных попытках, легко понять радость Эйнштейна, которому удалось дать необходимое объяснение без введения «каких-либо особых предположений». Мы не будем здесь подробно останавливаться на его вычислениях, так как они детально изложены в учебниках. Достаточно сказать следующее:

А. Эйнштейн начал со своих уравнений поля

$$r_{\mu\nu} = 0 \qquad (14.14)$$

для пустого пространства [см. (14.8)] и общего условия $\sqrt{g} = 1$

---

[22]) Подробный список ссылок на работы XIX в. можно найти в [O1, гл. 22, с. 94].

[23]) Эйнштейн взял это значение из обзора Фрейндлиха [F3]. О его высокой оценке измерений Ньюкома см. [E42].

[24]) Одно время, в 70-е годы прошлого века, казалось, что такая планета (получившая название Вулкан) действительно наблюдалась.

[25]) Подробно о работах Леверье и Ньюкома см. [C1].

[см. (14.12)]. В современных учебниках изложение начинается с выражения $R_{\mu\nu} = 0$ и выбора такой системы координат, в которой $\sqrt{g} = 1$. Естественно, и в том и в другом случае результат получается одинаковым; это Эйнштейн понял при подготовке своей статьи [E40].

Б. В уравнениях поля 18 ноября еще не было члена $g_{\mu\nu}R/2$. В данном случае этот член не играет никакой роли, что и подчеркнул Эйнштейн спустя неделю.

В. Приближенный метод, разработанный в статье, положил начало постньютоновой небесной механике. Эйнштейн искал то, что теперь называется статическим изотропным решением метрики (см. [W1, с. 176]). Он получил следующий результат: $g_{ik} = -\delta_{ik} - \alpha x_i x_k/r^3$, $g_{i0} = 0$, $g_{00} = -1 + \alpha/r$ $(i, k = 1, 2, 3)$, где α — постоянная интегрирования. Далее он провел разложение в ряд по α/r; выражение $\sqrt{g} = 1$ удовлетворяется для членов первого порядка. Теперь достаточно вычислить Γ^1_{jk} до первого порядка, Γ^i_{00} — до второго порядка. Полученные результаты подставляются в уравнение (12.28), после чего производится стандартный расчет для финитной орбиты. Итак, за неделю до завершения ОТО Эйнштейн получил следующее выражение для прецессии за один оборот: $24\pi^3 a^2/T^2c^2(1-e^2)$, что дает 43″ в столетие (a — большая полуось, T — период обращения, e — эксцентриситет; о соответствии этого результата современным экспериментальным данным см. [W1, с. 147]).

Г. Два месяца спустя, 16 января 1916 г. Эйнштейн прочитал от имени Карла Шварцшильда, находившегося на Русском фронте, доклад [S4] Прусской академии наук, в котором содержалось точное решение уравнений статического изотропного гравитационного поля материальной точки. Это было первое точное решение полных уравнений гравитационного поля, полученных Эйнштейном. А 24 февраля 1916 г. Эйнштейн прочел еще один доклад Шварцшильда [S5]. В нем предлагалось решение уравнений для материальной точки, находящейся в поле тяготения несжимаемого жидкого шара. Именно в этой работе впервые введено понятие радиуса Шварцшильда. Через четыре месяца, 29 июня 1916 г. Эйнштейн выступил перед Прусской академией с речью [E43], посвященной памяти Шварцшильда, скоропостижно скончавшегося 11 мая в результате болезни, которой он заразился на фронте. Эйнштейн говорил о большом таланте Шварцшильда и его теоретическом и экспериментальном вкладе в науку. Он также высоко отозвался о деятельности (с 1909 г.) Шварцшильда на посту директора потсдамской астрофизической обсерватории. В заключение он выразил уверенность в том, что работы Шварцшильда будут и в дальнейшем стимулировать развитие науки...

Вернемся теперь к статье от 18 ноября. Всего лишь полстраницы отвел Эйнштейн своему второму открытию: искривление световых лучей вдвое больше того, которое он рассчитал ранее.

«Световой луч, проходящий вблизи поверхности Солнца, должен испытывать отклонение на угол 1,7″ (вместо 0,85″).» Как известно [W1, с. 188], этот результат может быть получен с помощью тех же решений для $g_{\mu\nu}$, о которых шла речь выше, но для инфинитной орбиты[26]). Важные следствия этого результата будут обсуждаться в гл. 16.

Двадцать пятое ноября. Получено уравнение

$$R^{\mu\nu} = -\varkappa [T^{\mu\nu} - (1/2) g^{\mu\nu} T]. \qquad (14.15)$$

Дело сделано. Законы сохранения выполняются: выражение $\sqrt{g} = 1$ представляет собой не фундаментальное уравнение, а скорее важное указание способа выбора удобной системы координат. Тождество (14.9), ранее игравшее особую физическую роль, теперь становится тривиальным. Все это никак не сказывается на результатах вычислений, выполненных неделю назад: «Каждую физическую теорию, совместимую с частной теорией относительности, можно при помощи абсолютного дифференциального исчисления включить в схему общей теории относительности, причем последняя не дает какого-либо критерия **допустимости** физической теории... Тем самым, наконец, завершено построение общей теории относительности как логической схемы» [E1]. Отметим, что уравнение (14.15) эквивалентно уравнению $R^{\mu\nu} - g^{\mu\nu} R/2 = -\varkappa T^{\mu\nu}$.

В § 12.4 я уже упоминал о том, что Эйнштейн не знал тождеств Бьянки [W1, с. 147]

$$[R^{\mu\nu} - (1/2) g^{\mu\nu} R]_{;\nu} = 0 \qquad (14.16)$$

в то время, когда писал работу вместе с Гроссманом. Он по-прежнему не знал о них и 25 ноября, а значит, не понимал, что законы сохранения энергии-импульса

$$T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0 \qquad (14.17)$$

автоматически следуют из уравнений (14.15) и (14.16). *Поэтому он рассматривал законы сохранения как ограничение своей теории!* Изложим с небольшими изменениями аргументацию Эйнштейна. Начнем с уравнения (14.15), но заменим в нем коэффициент 1/2 подлежащим определению числом α. Выполним над (14.15) операцию ковариантного дифференцирования и используем уравнение (14.17). Возьмем далее след уравнения (14.15) и продифференцируем его. Получим $[R^{\mu\nu} + \alpha(1 - 4\alpha)^{-1} g^{\mu\nu} R]_{;\nu} = 0$ (при этом используется соотношение $g_{\mu\nu;\lambda} = 0$). *Выберем систему координат таким образом, чтобы* $\sqrt{g} = 1$. Найдем решение для α: получим $\alpha = 1/2$. Естественно, выбор Эйнштейном такой системы координат вполне допустим, но он накладывает излишнее ограничение, не позволившее ему обнаружить общековариант-

[26]) Эйнштейн подставил $g_{\mu\nu}$ в выражение $g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0$ и затем применил принцип Гюйгенса.

ность уравнения (14.16). О том, как, наконец, в физику проникли тождества Бьянки, будет рассказано в § 15.3.

Возможно, ошибочная вера Эйнштейна в справедливость уравнения (14.9) пошла ему на пользу, так как он получил это странное выражение тем же методом совместимости. Для уравнения (14.8) соответствующие соотношения записываются в форме $r = -\varkappa T$ и $\mathfrak{T}^{\mu\nu}_{\nu} = 0$. Левая часть уравнения (14.9) имеет такой вид потому, что в работе от 4 ноября Эйнштейн переопределил ковариантные производные [см. (14.3)] таким образом, что вместо уравнения (14.17) получил для законов сохранения следующее выражение: $\partial T^{\mu}_{\nu}/\partial x^{\mu} - T^{\alpha\beta}\partial g_{\alpha\beta}/2\partial x^{\nu} = 0$.

Двадцать восьмого ноября Эйнштейн написал Зоммерфельду о том, что три года назад они с Гроссманом рассматривали уравнение (14.15) «без второго члена в правой части», но пришли к ошибочному выводу, будто в нем не содержится приближение Ньютона [E34].

Десятого декабря он сообщил Бессо о том, что он «доволен, но сильно измотан» [E44].

Двадцатого июня 1933 г. эмигрировавший из Германии Эйнштейн прочитал в университете Глазго лекцию об основаниях ОТО. В заключение он сказал: «Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но это поймет только тот, кто пережил все сам» [E45].

§ 14.4. Эйнштейн и Гильберт [27])

Итак, 25 ноября Эйнштейн представил на заседании Прусской академии окончательный вариант уравнений гравитационного поля [см. (14.15)]. За пять дней до этого Давид Гильберт представил в Научное общество Геттингена работу [H4], в которой были приведены такие же уравнения, но с одним отличием. Эйнштейн, наученный ошибками предыдущих недель, оставил структуру тензора $T^{\mu\nu}$ совершенно свободной, определив лишь свойства преобразований и сохранения. Гильберт же подробно определил характеристики как силы тяготения, так и всех других сил. Поэтому (в чем, собственно, и состоит отличие) у него тензор $T^{\mu\nu}$ имеет определенную динамическую форму: «...я считаю, что [в моей статье] дается одновременно решение задач как Эйнштейна, так и Ми».

В 1912—1913 гг. Ми предложил теорию электромагнитного поля и вещества, основанную на калибровочно неинвариантном представлении уравнений Максвелла [M4]. Она должна была описывать все что угодно, кроме тяготения [28]). Идеи Ми обсуждались некоторое время в 20-е годы, но сейчас представляют

---

[27]) См. также [M3].

[28]) О взглядах Ми на природу тяготения рассказывалось в гл. 13. Комментарии Эйнштейна об электромагнитной теории Ми см. в [E46]. Сжатое изложение теории Ми можно найти в книгах Паули [P2] и Вейля [W3].

лишь исторический интерес и не имеют отношения к обсуждаемому вопросу. Гильберт же поставил перед собой задачу не только построить теорию тяготения, но и дать аксиоматическое описание картины мира. Этим объясняется как несколько экзальтированное изложение, начиная с заглавия «Основания физики», так и далеко идущие утверждения заключительного абзаца статьи, где он выражает уверенность в том, что полученные им фундаментальные уравнения позволят в конце концов найти решение загадки строения атома. В декабре 1915 г. Эйнштейн отметил, что с точки зрения ОТО приверженность Гильберта идеям Ми излишня [E47]. «Подход Гильберта к проблеме материи представляется мне ребяческим»,— написал Эйнштейн некоторое время спустя [E48]. Хотя эта критика и вполне оправданна, тем не менее, в работе Гильберта содержится очень важный и самостоятельный вклад в разработку ОТО — вывод уравнения (14.15) из вариационного принципа.

Гильберт не первый применил вариационный принцип к тяготению. До него это сделал Лоренц [L3], а за несколько недель до Гильберта так же поступил и Эйнштейн [E36]. Однако Гильберт первым записал этот принцип правильно:

$$\delta \int (L - R/2\varkappa)\, \sqrt{-g}\, d^4x = 0 \qquad (14.18)$$

для бесконечно малых вариаций $g^{\mu\nu}(x) \to g^{\mu\nu}(x) + \delta g^{\mu\nu}(x)$ таких, что $\delta g^{\mu\nu} = 0$ на границе области интегрирования (R — риманов скаляр кривизны, L — лагранжиан материи). Известно, что уравнение (14.18) приводит к (14.15), включая член со следом, в том случае, когда лагранжиан L зависит от $g^{\mu\nu}$, но не от их производных [29]).

В работе Гильберта дана также формулировка (но не доказательство!) следующей теоремы. Пусть J — скалярная функция n полей и пусть для вариаций $x^\mu \to x^\mu + \xi^\mu(x)$ при бесконечно малом ξ^μ $\delta \int J \sqrt{-g}\, d^4x = 0$. Тогда между n полями существуют четыре соотношения. Теперь известно, что это законы сохранения энергии-импульса [см. (14.17)], если $J = L$, или тождества [см. (14.16)], если $J = R$, но в 1915 г. это еще не было ясно. Судя по тому, как эта теорема используется в его теории, Гильберт неверно понял ее смысл. Пусть J соответствует полному гравитационно-электромагнитному лагранжиану Гильберта. Тогда J зависит от $(10+4)$ полей, от $g_{\mu\nu}$ и от электромагнитных потенциалов. Для них можно записать четыре тождества. «...На основании этой ... теоремы можно утверждать, что в указанном смысле явления электродинамики представляют собой эффекты гравитации. В этом выводе я усматриваю простое и совершенно не-

---

[29]) Подробно вариационный принцип обсуждается в работах [W1, гл. 12; M5]. Тензор $T^{\mu\nu}$ определяется выражением $\delta L = (1/2) \int \sqrt{-g}\, T^{\mu\nu}(x) \times \delta g_{\mu\nu}(x)\, d^4x$.

ожиданное решение проблемы Римана, первым начавшего теоретические изыскания относительно взаимосвязи между тяготением и светом»[30]). Очевидно, и Гильберт не был знаком с тождествами Бьянки!

Эти и другие ошибки были исправлены Гильбертом в статье, написанной в 1924 г. [H5]. Она вновь озаглавлена «Основания физики», содержит резюме его работы 1915 г. и дополнение к ней, написанное годом позже [H6]. В избранные труды Гильберта, предисловия к каждому из томов которых написаны им самим, эти две ранние статьи не входят; там напечатана лишь его работа 1924 г. [H7]. В этой последней работе Гильберт выражает благодарность Амали Эмми Нётер (работавшей в 1915 г. в Геттингене) за доказательство теоремы о четырех тождествах. Доказательство теоремы Нётер было опубликовано в 1918 г. [N4]. К 1924 г. Лоренц [L4], Феликс Клейн [K7], Эйнштейн [E49] и Вейль [W4] также опубликовали ряд работ о вариационных методах и вытекающих из них тождествах (см. § 15.3).

Вернемся теперь к Эйнштейну и Гильберту. Принимая во внимание, что уравнения гравитационного поля были получены ими практически одновременно, естественно задать вопрос: какого рода контакты поддерживали они между собой в 1915 г.? Обратимся к событиям лета этого года. Как упоминалось ранее, в конце июня — начале июля Эйнштейн провел около недели в Геттингене, где «увидел и полюбил Гильберта...». «Я прочитал там шесть двухчасовых лекций»,— вспоминал Эйнштейн [E9][31]). Темой лекций была ОТО. «К моему большому удовлетворению, мне удалось полностью убедить Гильберта и Клейна» [E50]. «Я высокого мнения о Гильберте — это крупная фигура...» [E31],— писал Эйнштейн по возвращении в Берлин. Судя по времени чтения лекций, их темой была несовершенная теория, изложенная в его работе от октября 1914 г. Я уже упоминал о том, что основных успехов Эйнштейн добился в октябре — ноябре 1915 г. Однако я не знаю, сколько времени ушло у Гильберта на подготовку статьи, представленной 20 ноября. В то же время имеется свидетельство Феликса Клейна о том, что, как и Эйнштейн, Гильберт добился окончательного результата осенью 1915 г., причем не в Геттингене, а на острове Рюген в Балтийском море [K8].

На события тех ноябрьских дней проливает свет переписка Гильберта с Эйнштейном. В период между 7 и 25 ноября Эйнштейн, обычно писавший массу писем, не переписывался ни с кем, кроме Гильберта (если полон принстонский архив Эйнштейна того периода). Посмотрим, о чем они писали друг другу.

Седьмое ноября: *Эйнштейн — Гильберту*. Посылает гранки статьи от 4 ноября, «в которой ... вывел уравнения гравитаци-

---

[30]) Здесь Гильберт ссылается на эссе Римана «Тяготение и свет», опубликованное в книге [R2].

[31]) Эйнштейн и Гильберт начали переписываться самое позднее в октябре 1912 г., когда Эйнштейн еще жил в Цюрихе.

онного поля, после того как понял четыре недели назад, что прежние методы доказательства были ошибочны». Он упоминает также о полученном от Зоммерфельда письме, в котором тот сообщал, что Гильберт также нашел возражения против октябрьской статьи 1914 г. [E33]. Мне кажется, что Эйнштейн завязал в ноябре переписку с Гильбертом, поняв, что не он один обнаружил изъяны в своих предыдущих работах.

Двенадцатое ноября: *Эйнштейн — Гильберту*. Сообщает о своем постулате $\sqrt{g} = 1$ (статья от 11 ноября) и направляет два экземпляра октябрьской статьи 1914 г. [E39].

Четырнадцатое ноября: *Гильберт — Эйнштейну*. Взволнованно сообщает о своем «аксиоматическом решении Вашей [поставленной Эйнштейном] великой проблемы... Из общей математической теоремы следует, что (обобщенные максвелловы) уравнения электродинамики есть математическое следствие уравнений гравитационного поля, т. е. между тяготением и электродинамикой нет никакого различия». Он приглашает Эйнштейна на свою лекцию, посвященную этой проблеме, которую намерен прочитать 16 ноября [H8].

Пятнадцатое ноября: *Эйнштейн — Гильберту*. «То, о чем Вы написали мне в открытке, вызывает огромные надежды». Эйнштейн приносит извинения по поводу того, что не сможет посетить лекцию из-за переутомления и болей в желудке. Он также просит Гильберта выслать экземпляр гранок его статьи [E51].

Восемнадцатое ноября: *Эйнштейн — Гильберту*. (Очевидно, Эйнштейн получил экземпляр работы Гильберта.) «Предложенная Вами система [уравнений], насколько я могу судить, в точности согласуется с тем, что я получил в последние недели и представил Академии» [E52].

Девятнадцатое ноября: *Гильберт — Эйнштейну*. Гильберт поздравляет Эйнштейна с решением проблемы смещения перигелия Меркурия. «Если бы я умел считать так же быстро, как Вы, то электрон капитулировал бы перед моими уравнениями, а атом водорода должен был бы принести извинения за то, что он не излучает» [H9]. На этом, за день до представления Гильбертом своей работы от 20 ноября, известная нам переписка между двумя учеными прекращается.

Вернемся к статье Эйнштейна от 18 ноября. Она была написана в то время, когда (по его собственному признанию) он был вне себя от возбуждения из-за объяснения смещения перигелия (о чем он официально объявил в этот день, 18 ноября), очень утомлен, нездоров, но продолжал работать над статьей от 25 ноября. Мне представляется крайне мало вероятным, чтобы он был в состоянии тогда усвоить содержание технически трудной работы Гильберта, полученной им 18 ноября. Годом позже Феликс Клейн писал, что уравнения этой статьи оказались настолько сложными, что он не смог их проверить [K9]. Верно, что в работе Гильберта был член, содержащий след, которого еще не было в

работе Эйнштейна [32]). Но, как упоминалось ранее, Эйнштейн ввел его позже, используя тот же прием, что и в работе от 4 ноября.

Поэтому мне кажется, что не следует придавать слишком большого значения как словам согласия Эйнштейна «насколько я могу судить», так и словам согласия Гильберта «как мне кажется» [H4]. Я скорее склонен присоединиться к мнению Клейна о том, что они «беседовали, не слушая друг друга, как нередко бывает с математиками, одновременно размышляющими над какой-то проблемой» [K10]. (Я здесь не останавливаюсь на том, что Эйнштейн назван математиком, хотя он никогда на это не претендовал.) Я опять-таки согласен с Клейном в том, что «здесь не может быть спора о приоритете, поскольку авторы использовали настолько разный подход, что сопоставимость полученных ими результатов стала очевидной отнюдь не сразу» [K11]. Я считаю, что Эйнштейн — единоличный создатель физической теории (ОТО), в то время как получение ее фундаментальных уравнений следует поставить в заслугу как ему, так и Гильберту.

Однако я не уверен, что главные действующие лица согласились бы с таким утверждением.

Что-то произошло между ними после 20 ноября, это подтверждает письмо Эйнштейна Гильберту от 20 декабря: «У нас произошла размолвка, причины которой я не хочу анализировать. Сейчас мне удалось полностью отделаться от горького чувства, которое она во мне вызвала. Я вновь думаю о Вас с ничем не замутненным дружеским чувством и прошу Вас поступить так же. Просто стыдно подумать, что двое приличных людей, сумевших отчасти отрешиться от мелких страстей человечества, не могут наслаждаться общением друг с другом» [E54]. Возможно, мы никогда не узнаем, что же произошло на самом деле. Однако в ответ на мой вопрос Э. Страус написал: «Эйнштейн считал, что Гильберт позаимствовал, хотя, возможно, и непреднамеренно, некоторые из идей (в основном неверных!), высказанных им во время выступления на коллоквиуме в Геттингене [33]). По словам Эйнштейна, Гильберт направил ему письменные извинения, где упомянул, что «[это выступление] совершенно выпало [у него] из памяти...» [S1]. Как бы то ни было, и Эйнштейн и Гильберт пережили эту размолвку. Переписка между ними в дальнейшем носила вполне дружеский характер. В мае 1916 г. Эйнштейн докладывал на одном из семинаров в Берлине работу Гильберта [E55]. Видимо, тогда он критически отозвался о подходе Гиль-

---

[32]) Гильбертов тензор $T_{\mu\nu}$ имеет не равный нулю след потому, что у него L относится к теории Ми. Мне трудно поверить в то, что Эйнштейн мог считать, будто тензор T у Гильберта должен обратиться в нуль [E53].

[33]) Я вынужден считать, что здесь имеется в виду коллоквиум, проходивший в июне — июле, поскольку маловероятно, чтобы Эйнштейн побывал в Геттингене в ноябре 1915 г.

берта[34]). В мае 1917 г. Эйнштейн сказал одному из геттингенских студентов: «Это чересчур дерзкий замысел — пытаться строить картину мира сейчас, когда мы не имеем даже отдаленного представления об очень многих явлениях» [S6]; при этом он, очевидно, имел в виду попытки Гильберта объединить тяготение и электромагнетизм. Когда Эйнштейн произнес эти слова, ему было 38 лет. Вскоре он приступил к построению собственной картины мира...

Глава 15. НОВАЯ ДИНАМИКА

§ 15.1. С 1915 по 1980 г.

Эйнштейн пришел к специальной теории относительности после десяти лет размышлений над свойствами света. Однако все эти годы его интересовали и другие области физики. Он много думал над статистической механикой и над смыслом закона излучения Планка. Кроме того, он занимался экспериментальной работой. Последние шаги, предшествовавшие написанию июньской статьи 1905 г., заняли менее двух месяцев напряженной работы.

Эйнштейн пришел к общей теории относительности после восьми лет размышлений над природой тяготения. Однако все эти годы его интересовали и другие области физики. Он много думал над квантовой физикой и статистической механикой. Кроме того, он занимался экспериментальной работой. Последние шаги, предшествовавшие написанию статьи от 25 ноября 1915 г., заняли менее двух месяцев напряженной работы.

Больше история создания ОТО ничем не похожа на историю создания СТО. В июне 1905 г., в первой же статье Эйнштейн предложил СТО в законченном виде, тогда как статье от 25 ноября 1915 г. предшествовало более дюжины работ о тяготении, во многих из которых он отказывался от выводов, полученных ранее. Вне всякого сомнения, статья от 25 ноября представляет собой монументальное творение, однако, в отличие от июньской статьи 1905 г., она является лишь первым плацдармом на новой территории. Единственным надежным маяком (но зато каким!) ко времени ее публикации было полученное всего за неделю до этого совпадение между рассчитанным по теории и наблюдавшимся значениями прецессии перигелия Меркурия. Как в 1905 г., так и в 1915 г. Эйнштейн выдвинул новые фундаментальные принципы. Я уже неоднократно подчеркивал, что теория 1905 г. была по характеру чисто кинематической, и следующее поколение физиков смогло усвоить ее основные положения.

---

[34]) Эйнштейн писал Эренфесту: «Мне не нравится изложение Гильберта... излишне детализированное ... излишне усложненное ... недобросовестное по структуре (изложение „сверхчеловека", скрывающего свой метод)...» [E56].

В общей же теории относительности новая кинематика тесно переплетается с новой динамикой. Одно из кинематических нововведений сразу же бросается в глаза: лоренц-инвариантность не является более глобальным свойством, но продолжает играть центральную роль как локальная инвариантность. Однако новая динамика, вытекавшая из уравнений общей теории относительности, не была до конца понята ни при жизни Эйнштейна, ни спустя четверть века после его смерти. Конечно, за время, прошедшее с 1915 г., мы стали понимать ОТО значительно лучше, укрепилась вера в нее, и, кстати, до сих пор не удалось установить надежно пределы ее справедливости, однако даже на чисто классическом уровне никто сегодня не осмелится утверждать, что он полностью понимает все богатейшее динамическое содержание нелинейной динамики, именуемой общей теорией относительности.

Завершив портрет Эйнштейна — творца ОТО, перехожу к краткому рассказу о том, как Эйнштейн стал ее применять. При этом я не буду останавливаться на его работах, посвященных единой теории поля, о которых речь пойдет в гл. 17.

Сейчас, когда я пишу эту главу, мой стол завален бумагами. Естественно, под рукой — экземпляры статей Эйнштейна. Кроме того, неподалеку лежат и книги: энциклопедическая статья Паули о теории относительности, написанная в 1920 г., и ее перевод на английский [P1], представляющий особый интерес из-за примечаний, добавленных Паули в середине 50-х годов; несколько изданий книги Вейля «Пространство, время, материя» (в том числе английский перевод четвертого издания [W1]), интересных теми изменениями, которые вносились в разные издания,— это помогает понять развитие ОТО в первое десятилетие после ее создания; книга Норта, в которой прослеживается история развития современной космологии до 1965 г. [N1]; хороший справочник по космологии, опубликованный Американской ассоциацией учителей физики [S1], и, для развлечения, сборник статей по космологии Мюница [M1], в котором старейшим автором является Платон, а самым молодым — мой друг Деннис Шама. Вместе взятые, эти книги служат прекрасными помощниками при рассмотрении периода с 1915 по 1925 г. Они позволяют мне ограничиться лишь общей характеристикой тех лет и отсылать читателя за подробностями к этим легкодоступным публикациям.

Но у меня на столе лежат и другие книги. Современные издания книг Вейнберга [W2], Мизнера, Торна и Уилера [M2] служат источником информации о развитии ОТО в последние годы жизни Эйнштейна и позднее. Есть в моей неполной библиотеке и современные доклады на семинаре по источникам и детекторам гравитационного излучения [S2], обзор Хокинга и Израэля, посвященный столетию Эйнштейна [H1], материалы принстонского юбилейного симпозиума [W3] и два юбилейных тома, опубликованные Международным обществом общей теории относительно-

сти и гравитации [H2]. Эти пять томов я держу на столе по двум причинам: во-первых, эти солидные современные обзоры освобождают меня от необходимости подробно останавливаться на истории развития ОТО до наших дней (что, несомненно, далеко выходит за рамки данной книги и компетентности ее автора) и, во-вторых, напоминают мне о том, что мое изложение данной теории было бы однобоким, если бы я не указал на огромные перемены, происшедшие в области разработки ОТО к сегодняшнему дню, по сравнению с положением дел в ней при жизни Эйнштейна. Я собираюсь прокомментировать эти перемены и призываю читателя в случае необходимости обращаться к упомянутым выше публикациям за дополнительной информацией.

Прежде чем перейти к непосредственному анализу работ Эйнштейна, рассмотрим в общих чертах весь период с 1915 г. по настоящее время.

Десятилетие 1915—1925 гг. было периодом закрепления позиций и выдвижения новых идей. Основные результаты: введение в математику Леви-Чивитой в 1917 г. понятия параллельного переноса [L1], понятия, которое вскоре стало широко применяться в ОТО; лучшее понимание законов сохранения энергии-импульса, явившееся результатом работ Эйнштейна, Гильберта, Феликса Клейна, Лоренца, Шрёдингера и Германа Вейля; первые работы Эйнштейна о гравитационных волнах и пионерские исследования в области релятивистской космологии Эйнштейна, Виллема де Ситтера и Александра Александровича Фридмана. Число физиков-теоретиков, работавших в области ОТО, было невелико, но постоянно росло.

Удалось добиться также и важных экспериментальных результатов. Экспедиции, наблюдавшие солнечное затмение 1919 г., обнаружили, что искривление лучей света близко к значению, предсказанному Эйнштейном в статье от 18 ноября 1915 г. [E1]. (Об этом будет рассказано в следующей главе.) Первое десятилетие существования ОТО ознаменовалось сообщением об экспериментальном открытии, сделанном Эдвином Пауэллом Хабблом в декабре 1924 г. и положившем конец более чем вековому спору: впервые было неопровержимо доказано существование внегалактического объекта Мессье 31, туманности Андромеды [H3] [1]). Теоретические исследования космологических моделей получили еще более мощный импульс в результате великого открытия, сделанного Хабблом в 1929 г.: Вселенная расширяется — туманности разбегаются, причем скорость их разбегания пропорциональна расстоянию до них. По словам самого Хаббла, имеется «...примерно линейная зависимость между скоростями и расстояниями... Значение результата в том, что ...появляется возмож-

[1]) Вкратце об истории измерения космических расстояний рассказано в [W2, гл. 14, разд. 5].

ность воспользоваться при обсуждении проблемы общей кривизны пространства числовыми данными» [H3a][2]). Хотя по космологии по-прежнему публиковалось немного работ, качество их было очень высоким[3]). В тот же период предпринималось несколько попыток создания неоевклидовой теории тяготения [N1, гл. 8, 9], но ни одна из них не оставила следа в космологии.

Ученых, активно занимавшихся ОТО, было немного и в 30-е, 40-е годы и в начале 50-х годов. Вспоминая о тех временах, Питер Бергман однажды сказал мне: «Достаточно было знать, чем занимаются шесть твоих лучших друзей, чтобы быть в курсе всего, что делается в общей теории относительности». Продолжалось исследование космологических моделей и частных решений уравнений Эйнштейна. Велись также работы по изучению проблемы движения, которой Эйнштейн интересовался после 1927 г.: возможности получения из уравнений гравитационного поля уравнений движения распределенной материи. Принято считать, что этот период в основном характеризуется «тремя успехами»: обоснованием прецессии перигелия Меркурия, обнаружением искривления лучей света и красного смещения, а также объяснением расширения Вселенной.

В 30-е годы произошло еще одно событие, которое на короткое время привлекло к себе внимание, затем примерно четверть века оставалось в тени, после чего вызвало к жизни одно из основных направлений ОТО. Разрабатывая конкретную проблему ядерной физики, Роберт Оппенгеймер и его сотрудник Роберт Сербер решили рассмотреть относительное влияние ядерных и гравитационных сил в нейтронных звездах [O1][4]). Среди прочего они пытались уточнить результаты, полученные Львом Давидовичем Ландау для предельной массы, при превышении которой обычная звезда превращается в нейтронную. (Л. Д. Ландау рассматривал модель, в которой эта масса составляла примерно 0,001 солнечной.) Он также предположил, что каждая звезда имеет внутреннюю нейтронную сердцевину [L2a]. Работа Оппенгеймера и Сербера привлекла внимание Ричарда Чейса Толмена, и в результате дискуссий Толмена с Оппенгеймером и его сотрудниками в 1939 г. вышли в свет две статьи: Толмена о статических решениях уравнений поля Эйнштейна для жидких сфер [T1] и непосредственно вытекающая из нее работа Оппенгеймера и Джорджа Волкова «О массивных нейтронных сердцевинах» [O2]. В последней работе заложены основы общерелятивистской теории строения звезд. В качестве модели рассматривается статическая сферическая звезда, состоящая из идеаль-

---

[2]) Предыстория установления закона Хаббла и уточнения значения постоянной Хаббла в последующие десятилетия приводится в [N1, гл. 7].

[3]) Наиболее подробная библиография по теории относительности до 1924 г. составлена Лека [L2]; см. также [N2]. Список основных работ по космологии за период с 1917 по 1932 г. приведен в [R1].

[4]) Я благодарен Роберту Серберу за обсуждение статьи о нейтронных звездах, написанной Оппенгеймером с сотрудниками.

ного ферми-газа нейтронов. Авторы обнаружили, что звезда пребывает в устойчивом состоянии до тех пор, пока ее масса не превышает 1/3 солнечной. (Наиболее точное известное на сегодня значение массы звезды, состоящей из газа свободных нейтронов, равно примерно 0,7 массы Солнца и носит название предела Оппенгеймера — Волкова [5]).) Спустя еще полгода вышла в свет статья Оппенгеймера и Хартленда Снайдера «О безграничном гравитационном сжатии» [O3]. Первые строки резюме статьи гласят: «После истощения всех источников термоядерной энергии достаточно массивная звезда претерпевает коллапс. Сжатие, которое следует затем, будет происходить безгранично». Так зародилась физика черных дыр; это название для окончательно сколлапсированного состояния было предложено Джоном Арчибальдом Уилером на конференции, проходившей осенью 1967 г. в Годдардовском институте космических исследований в Нью-Йорке [W4]. Незадолго до этого были открыты пульсары, а нейтронные звезды и черные дыры уже не считались более «экзотическими объектами, упоминающимися в учебниках в качестве курьезов... Совместными усилиями специалистов, работавших в радио- и оптической астрономии, удалось открыть в небесах много новых странных явлений» [W2, с. 297].

Все изложенное подводит нас к рассмотрению тех изменений, которые произошли в подходе к разработке ОТО после смерти Эйнштейна.

При жизни Эйнштейна не состоялось ни одной крупной международной конференции, посвященной исключительно ОТО и тяготению [6]). Первая международная конференция, посвященная этой теме, состоялась в Берне в июле 1955 г., спустя три месяца после кончины Эйнштейна. Конференция была созвана для того, чтобы отметить 50-летие создания теории относительности. На нее был приглашен и Эйнштейн, но он был вынужден отказаться от участия из-за болезни. Тем не менее, он письменно обратился к организаторам с просьбой должным образом отметить заслуги Лоренца и Пуанкаре. Составлением научной программы руководил Паули. Изучая труды этой конференции [7]), отмечаешь, что в основном проблемы теории относительности рассматривались по-старому (впрочем, иначе и быть не могло). В этой конференции, называемой сейчас GR0 [8]), приняли уча-

---

[5]) Более подробно об этом см. в [M2, с. 627].

[6]) На Сольвеевских конгрессах (потерявших с течением времени значение наиболее представительного собрания ученых) эти проблемы не рассматривались до 1958 г. [M3].

[7]) Опубликованы как приложение 4 к «Helvetica Physica Acta», 1956 г.

[8]) Некоторые называют эту конференцию GR1, не присваивая номера крупной встрече, состоявшейся в Чэпел-Хилл. Труды GR0, GR1 см.: Rev. Mod. Phys.— 1957.— Vol. 29.— P. 351—546; GR2 — CNRS Report, 1962; GR3-Proc. Conférence International sur les Théories de la Gravitation, Gautier — Villars, 1964; GR7 — [S3]. Часть докладов, представленных на конференциях GR, которые состоялись после 1970 г., опубликована в журнале «General Relativity and Gravitation».

стие 89 ученых из 22 стран. Она стала первой в серии международных конференций, посвященных проблемам ОТО и гравитации: GR1 проходила в Чэпел-Хилл, Сев. Каролина (1957), GR2 — в Руайомон (1959), GR3 — в Варшаве (1962), GR4 — в Лондоне (1965), GR5 — в Тбилиси (1968), GR6 — в Копенгагене (1971), GR7 — в Тель-Авиве (1974), GR8 — в Ватерлоо, Канада (1977). Последняя из этих встреч, GR9, состоялась в июне 1980 г. в Йене. Интерес к обсуждавшимся там проблемам явно возрос, о чем свидетельствует присутствие на конференции приблизительно 800 участников из 53 стран.

Что же вызвало такой всплеск интереса и когда он начался? Вот что ответил на этот вопрос Деннис Шама: «Спустя два года после Бернской встречи состоялась конференция в Чэпел-Хилл, организованная Брюсом де Виттом... Можно сказать, с этого все и началось; там собрались люди, ранее работавшие порознь, увидели, что они подошли к примерно одинаковым проблемам, и это вдохновило их на продолжение работы. Так зародилась „семья релятивистов“. Другой, несомненно, более важной причиной явились блестящие достижения наблюдательной астрономии. Первым из них, по-видимому, стала идентификация в 1954 г. Лебедя А — второго по мощности источника радиоизлучения — с удаленной галактикой. Это означало, что а) галактики, находящиеся на расстоянии радиуса Хаббла, могут наблюдаться средствами радиоастрономии (но не в оптическом диапазоне), б) энергия, излучаемая такой радиогалактикой (на основе гипотезы о синхротронном механизме генерации радиоизлучения) соответствует энергии массы покоя, примерно равной 10^8 солнечных масс, т. е. 10^{-3} массы галактики. В 1962 г. были обнаружены источники рентгеновского излучения, в 1963 г.— квазары, в 1965 г.— реликтовое излучение с температурой 3 К и в 1967 г.— пульсары. Предположение о существовании черной дыры в Лебеде X-1 датируется 1972 г. Крупным достижением стал также предложенный Крускалом в 1960 г. подход [9]) к решению Шварцшильда; тем самым был открыт путь к современной теории черных дыр» [S5]. Итак, основным стимулом расширения деятельности и появления новых направлений в ОТО явились экспериментально полученные результаты. На смену нескольким десяткам исследователей, работавших во времена Эйнштейна, пришло новое поколение ученых, примерно в сто раз более многочисленное.

Сейчас, в 1982 г., когда я пишу эту книгу, начальный период эры, о котором говорил Шама, сменился периодом новых крупных достижений. В июне 1980 г. я приехал на конференцию GR9, чтобы узнать, что нового произошло в этой области. О некоторых своих впечатлениях я расскажу ниже. Каждый из по-

[9]) Здесь имеется в виду координатная система, предложенная независимо Крускалом [K1] и Секерешем [S4]. Более подробно об этом см. в [M2, гл. 31].

следующих пяти параграфов посвящен одной из проблем ОТО, которыми активно занимался после 1915 г. сам Эйнштейн. В каждом из параграфов я укажу, что было сделано им, а затем вкратце остановлюсь на дальнейшем развитии этой области физики. В последнем параграфе я перечислю те проблемы, разработка которых целиком относится к периоду, начавшемуся после смерти Эйнштейна.

§ 15.2. «Три успеха»

В 1933 г., рассказывая в Глазго об истоках ОТО [E2], Эйнштейн вспоминал о трудностях, с которыми он столкнулся: «...заблуждение стоило мне двух лет чрезвычайно тяжелой работы, пока я, наконец, не убедился в этом в конце 1915 г. и нашел связь теории с данными астрономических наблюдений, после чего я с раскаянием вернулся к римановой кривизне».

Период с 1914 по 1915 г. был смутным временем не только для Эйнштейна, но и для тех его коллег, которые пытались уследить за зигзагами его пути. Например, Эренфест в письме Лоренцу от декабря 1915 г. называет то, что принято считать сейчас общей теорией относительности, «теорией, предложенной 25 ноября 1915 г.». Он спрашивает Лоренца, верно ли его мнение о том, что Эйнштейн теперь отказался от аргументации невозможности представления уравнений гравитационного поля в ковариантной форме, выдвинутой в 1914 г. [E3]. Очень интенсивная переписка Лоренца с Эренфестом в декабре 1915 — январе 1916 г. позволяет лучше понять характеры обоих ученых. Шестидесятидвухлетний Лоренц у себя в Гарлеме проводит расчеты, допускает ошибки, исправляет их и, наконец, осознает, что имеет в виду Эйнштейн. В письме Эренфесту он пишет: «Я поздравил Эйнштейна с полученным им блестящим результатом» [L3]. Тридцатипятилетний Эренфест живет в Лейдене, в двух десятках километров от Лоренца, и тоже изо всех сил работает над теорией относительности. В его ответе на письмо Лоренца проглядывает отчаянье, которое в конце концов полностью захлестнуло его: «Ваши слова: „Я поздравил Эйнштейна с полученным им блестящим результатом“ напоминают мне тот секретный знак, которым масоны приветствуют друг друга» [E4].

В это время Лоренц получает от Эйнштейна письмо, в котором тот выражает благодарность за высокую оценку его работы и, кроме того, пишет: «Серия моих статей о тяготении — это цепь неверных шагов, которые, тем не менее, постепенно привели в поставленной цели. Так, основные уравнения в конечном итоге оказались верными, но вывод их ужасен; этот недостаток необходимо устранить» [E5]. Далее он говорит, что эта миссия очень подошла бы Лоренцу: «Я мог бы и сам сделать это, так как теперь мне все ясно, но, к сожалению, природа обделила меня даром четко излагать мысли, поэтому то, что я пишу, верно, но совершенно неудобоваримо». Вскоре Лоренц вновь делится

с Эренфестом: «Я написал Эйнштейну, что сейчас, когда разработка его теории достигла апофеоза, было бы очень важно изложить ее основы в максимально короткой форме, с тем чтобы каждый физик (или хотя бы большинство из них) мог познакомиться с ней. Я добавил, что мне самому очень хотелось бы попробовать сделать это, но было бы гораздо лучше, если бы он занялся этим сам» [L4].

Возможно, отцовский совет Лоренца повлиял на решение Эйнштейна написать первое резюме своей новой теории [E6][10]). Эта изящная работа объемом 50 страниц была закончена в марте 1916 г. и тепло встречена научными кругами. Наверное, это вдохновило Эйнштейна, который на самом деле не так уж плохо излагал свои мысли, на написание еще одной статьи. В декабре 1916 г. он закончил работу «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)»[11]) — наиболее известное из его произведений [E8a]. Спрос на нее особенно возрос после того, как стали известны результаты экспедиции, наблюдавшей затмение Солнца; эти результаты вызвали очень широкий отклик (см. гл. 16). Десятое издание этой книги на английском языке вышло в 1920 г., двадцать второе — в 1972 г.

Статья, написанная Эйнштейном в марте 1916 г., заканчивается кратким упоминанием о трех новых явлениях, предсказываемых ОТО: красном смещении, искривлении лучей света и прецессии перигелия Меркурия. В последнем абзаце статьи говорится о единственном экспериментальном подтверждении теории на тот момент — аномалии движения Меркурия. В 1916 г. практически ничего не было известно о красном смещении; искривление лучей света впервые наблюдалось в 1919 г.

Касаясь положения дел в области экспериментальной проверки ОТО в 1979 г., Дэвид Уилкинсон заметил: «После двух первых успехов — объяснения прецессии и предсказания искривления лучей света — наступили два десятилетия мучительно медленного прогресса в области экспериментов. Почти 60 лет потребовалось для того, чтобы добиться экспериментальной проверки ОТО с погрешностью до 1 %. Прогресс потребовал создания техники и экспериментальных методик, далеко выходящих за рамки возможностей начала 20-х годов» [W5].

Читателей, интересующихся техническими и социологическими аспектами современных релятивистских экспериментов, я отсылаю к этой работе Уилкинсона. Обзор и анализ современных экспериментов по проверке ОТО (кроме космологии) можно найти в докладе Ирвина Шапиро, откуда следует, что в пределах погрешностей измерений подтверждаются предсказания ОТО по

---

[10]) Эта статья была напечатана в журнале «Annalen der Physik», а также вышла в 1916 г. в виде отдельного издания, неоднократно перепечатывавшегося и переведенного на английский [E8].

[11]) Под таким названием она вышла в переводе на английский (Lond.: Methuen, 1920). Эйнштейн часто в шутку говорил, что ее следовало бы озаглавить «Общедоступное изложение».

красному смещению (как в космических, так и в наземных измерениях), прецессии перигелиев Меркурия и других небесных тел, а также принципу эквивалентности, который проверялся в современных уточненных экспериментах [S6]. В другом современном обзоре положение дел на сегодняшний день резюмируется следующим образом: «До сих пор [ОТО] выдерживала все испытания, но впереди грядут новые и притом в новых областях. Для одних вопрос о том, „выживет“ ли общая теория относительности, является предметом размышлений, другим сулит затаенную надежду, у третьих утвердительный ответ не вызывает ни малейших сомнений» [W6].

Желая всяческих успехов исследователям и возлагая большие надежды на будущие эксперименты с использованием ракет, спутников и межпланетных зондов, я заканчиваю на этом рассмотрение вопроса об экспериментальной проверке ОТО.

А что же говорил позднее сам Эйнштейн о трех успехах своей теории? В предыдущей главе я уже писал о том, как он был взволнован, узнав, что верно рассчитал прецессию перигелия Меркурия. Поздравляя Лоренца с новым 1916 г. («Желаю Вам и Вашей семье счастливого Нового года, а Европе — справедливого и прочного мира»), Эйнштейн по-прежнему подчеркивал важность этого открытия: «Я сейчас наслаждаюсь доставшейся тяжким трудом ясностью объяснения смещения перигелия Меркурия» [E9]. В следующей главе я расскажу о том, какое впечатление произвели на него результаты экспедиций, наблюдавших солнечное затмение в 1919 г. Однако вполне естественно, что позднее он старался подчеркнуть простоту самой теории, а не ее следствия. В 1930 г. он писал: «Я считаю, что основным оправданием общей теории относительности является не предсказание некоторых малых наблюдаемых эффектов, а простота ее основ и логичность» [E10]. Эйнштейн все больше подчеркивал формальные аспекты. В том же 1930 г. он сказал, что «...[ОТО] представляет собой чисто формальную точку зрения, а не какую-то определенную гипотезу о природе... Перелятивистская теория содержит не только высказывания об *объектах*, но и высказывания, относящиеся к *координатным системам*, служащим для их описания. Следовательно, с логической точки зрения такая теория менее удовлетворительна, чем релятивистская, высказывания которой не зависят от выбора координат» [E11]. В 1932 г. он пошел еще дальше: «По моему мнению, эта теория [ОТО] обладает малой внутренней вероятностью... Переменные поля $g_{\mu\nu}$ и φ_μ [электромагнитные потенциалы] не соответствуют *единому* представлению о структуре континуума» [E12].

Итак, мы видим, что Эйнштейна перестает радовать успешная интерпретация экспериментальных фактов, он переходит к более абстрактным рассуждениям, и, наконец, его больше не удовлетворяют собственные результаты, о чем свидетельствуют попытки построения единой теории поля. Ему не удается более использовать малые эффекты для дальнейшего расширения фи-

зических знаний, но и мы по сей день не обнаружили каких-либо малых эффектов, угрожающих физическим принципам, которыми мы, возможно, неуклюже оперируем.

Однако из ОТО все же следуют некоторые малые новые эффекты, так сказать, обычного типа. Один из них привлек внимание Эйнштейна в 1936 г., когда Р. В. Мандль указал ему на то, что если наблюдатель находится точно на одной прямой с «близкой» и «удаленной» звездами, то в результате искривления лучей света, идущих от дальней звезды, гравитационным полем ближней он увидит изображение дальней звезды в виде светящегося круга [M4]. Эта идея, естественно, не нова. Еще Эддингтон знал, что если две звезды не находятся точно на одной прямой с наблюдателем, то можно видеть два точечных изображения далекой звезды [E12a, с. 134]. Как бы то ни было, к удовольствию Мандля [M5] Эйнштейн опубликовал расчет зависимости интенсивности изображения от смещения наблюдателя относительно продолжения линии, проходящей через центры обеих звезд [E12] [12]). Он считал, что «...нельзя надеяться на то, что удастся прямо наблюдать это явление». Однако в 1979 г. было показано, что считавшийся ранее двойным квазар 0957 + 561 A, B есть на самом деле двойное изображение одного квазара [W7]. Находящаяся на пути электромагнитных волн галактика действует как гравитационная линза [Y1].

§ 15.3. Законы сохранения энергии-импульса; тождества Бьянки

В избранные труды Феликса Клейна входит ряд статей, посвященных связи геометрии с теорией групп и теорией инвариантов и известных под названием «Эрлангенская программа». В последних трех статьях этой серии рассмотрены вопросы ОТО. («Теория относительности и ее связь с идеями Эрлангенской программы вызвала у Клейна последний всплеск интереса и позволила ему получить последние математические результаты» [W8].) Одна из них, законченная в 1918 г., озаглавлена «О дифференциальных законах сохранения импульса и энергии в теории тяготения Эйнштейна» [K2]. Во введении Клейн замечает: «Будет показано, что при последующем рассмотрении [законов сохранения] нет более необходимости заниматься вычислениями, достаточно воспользоваться элементарными формулами вариационного исчисления». В том же году доказала свою теорему Э. Нётер.

Но в ноябре 1915 г. ни Гильберт, ни Эйнштейн не знали об этом королевском пути к законам сохранения, хотя Гильберт был довольно близок к цели. Напомню некоторые из его выводов, обсуждавшихся в § 14.4. Он верно вывел уравнения гравита-

[12]) О последующих расчетах этого эффекта см. [S6a].

ционного поля из вариационного принципа

$$\delta \int (L - R/2\varkappa)\sqrt{-g}\, d^4x = 0 \qquad (15.1)$$

для вариаций $g_{\mu\nu} \to g_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}$, где $\delta g_{\mu\nu}$ бесконечно мало и становится равным нулю на границе области интегрирования. Без доказательства он сформулировал теорему о том, что если J есть скалярная функция n полей и если

$$\delta \int J\sqrt{-g}\, d^4x = 0 \quad \text{для} \quad x^\mu \to x^\mu + \xi^\mu, \qquad (15.2)$$

то между n полями имеется четыре тождества. По мнению Гильберта, из этих тождеств вытекает, что электромагнетизм является следствием гравитации; он не заметил, что из этой теоремы сразу же получаются законы сохранения [H4]. В добавлении к работе 1915 г., представленном в декабре 1916 г. [H5], Гильберт толкует уравнение (15.2) по-прежнему. (Учитывая взаимоотношения Гильберта и Эйнштейна, интересно отметить, что в этой второй работе Гильберт говорит о теме своего исследования как о «...новой физике принципа относительности Эйнштейна» [H5, с. 63].) Что касается Эйнштейна, то и в 1914 г. [E13], и 4 ноября 1915 г. [E14] он получил уравнения гравитационного поля из вариационного принципа, но ни одно из них нельзя назвать верным. В его статье от 25 ноября 1915 г. [E15] сохранение энергии-импульса выступает в качестве ограничения теории, а не следует почти автоматически из общей ковариантности; вариационный принцип здесь не используется.

Итак, я утверждаю, что ни Гильберт, ни Эйнштейн не знали тождеств Бьянки в тот критический ноябрь 1915 г. Посмотрим, как развивались события в последующие годы.

Законы сохранения были слабым местом и в статье Эйнштейна, написанной в марте 1916 г. [E6]. В ней используется вариационный принцип, но лишь для «чистого» тяготения; математические выкладки неверны[13]); материя вводится допустимым, но не систематическим образом [E6, разд. 16], а законы сохранения проверяются прямым расчетом, а не из рассмотрения инвариантности [E6, разд. 17]. В октябре 1916 г. Эйнштейн вновь возвращается к законам сохранения энергии-импульса [E16][14]). Теперь он дает общее доказательство (без координатных условий) того, что для любого лагранжиана материи L тензор энергии-импульса $T^{\mu\nu}$ удовлетворяет выражению

$$T^{\mu\nu}_{\ \ ;\nu} = 0, \qquad (15.3)$$

следующему из уравнений гравитационного поля. Я вскоре вернусь к этой работе, но сначала расскажу еще об одном событии.

[13]) Как мне сказал Баргман, Эйнштейн сначала выделил координатное условие $\sqrt{-g} = 1$, а затем ввел вариационный принцип без учета лагранжева множителя, требуемого этим условием.

[14]) Перевод этой работы на английский включен в известный сборник статей Эйнштейна, Лоренца, Минковского и Вейля [S7].

В августе 1917 г. Герман Вейль наконец детально рассмотрел вариационный принцип [уравнение (15.2)] [W9]. Предположим, говорит Вейль, что ξ^μ бесконечно малы, а также что ξ^μ и их производные становятся равными нулю на границе области интегрирования. Тогда для случая $J = L$ выполняется уравнение (15.3), в то время как для случая $J = R$ получаем [15])

$$[R^{\mu\nu} - (1/2)g^{\mu\nu}R]_{;\nu} = 0. \qquad (15.4)$$

Как видно из переписки Феликса Клейна с Гильбертом, опубликованной Клейном в начале 1918 г. [K4], в геттингенских кругах довольно скоро поняли, что правильное применение указанного принципа [уравнения (15.2)] к ОТО приводит к восьми, а не к четырем тождествам: четырем для $J = L$ и четырем для $J = R$.

Как это ни странно, но в 1917 г. специалисты еще не знали, что вывод уравнения (15.4), данный Вейлем вариационным методом, был новым способом получения давно известного результата. Ни Гильберт, ни Клейн (ни тем более Эйнштейн) не знали, что уравнение (15.4) — выражение для свернутых тождеств Бьянки — было получено гораздо раньше сначала немецким математиком Аурелем Фоссом в 1880 г., затем независимо Риччи в 1889 г. и, наконец, также независимо бывшим учеником Клейна Луиджи Бьянки в 1902 г.[16]). Имени Бьянки нет ни в одном из пяти немецких изданий книги Вейля «Пространство. Время. Материя» (пятое издание вышло в 1923 г.); нет его и в обзорной статье Паули 1921 г. [P2]. В 1920 г. Эддингтон писал в своей книге «Пространство, время и тяготение»: «Сомневаюсь, чтобы кто-нибудь уже выполнил трудоемкую задачу проверки этих тождеств непосредственным применением алгебры» [E12a, с. 209]. В следующем году он сам занялся этим [E17]. В 1922 г. Джеффри был дан более простой вывод [J1], после чего было замечено, что уравнение (15.4) следует из выражения

$$R_{\lambda\mu\nu\sigma;\varkappa} + R_{\lambda\mu\varkappa\nu;\sigma} + R_{\lambda\mu\sigma\varkappa;\nu} = 0, \qquad (15.5)$$

известного сейчас под названием собственно тождеств Бьянки, где $R_{\lambda\mu\nu\sigma}$ — риманов тензор кривизны [H6] [17]). Харвард, автор этой статьи, заметил: «Я установил общую теорему [уравнение (15.5)] самостоятельно, но не могу поверить, чтобы она не была доказана ранее». Он был прав в своем предположении, поскольку действительно уравнение (15.5) было выведено великими учеными прошлого, о чем сообщили молодому поколению голландские математики Ян Схоутен и Дирк Стройк в 1924 г.: «Интересно отметить, что данная теорема [уравнение (15.5)] известна в Германии и Италии под названием „тождества Бьянки“» [S9].

---

[15]) Такой способ вывода уравнений (15.3) и (15.4) приводится в [W2, гл. 12, разд. 3, 4]. Другие работы на ту же тему обсуждаются в [P1, разд. 54]. О соотношении результатов Вейля и Клейна см. [K3].

[16]) Более подробно об истории вопроса можно прочитать во втором издании книги Схоутена [S8].

[17]) Уравнение (15.4) получается из (15.5) сверткой и использованием свойств симметрии тензора Римана [W2, гл. 9, разд. 8].

Сейчас известно, что тождества (15.3) и (15.4) являются частными следствиями знаменитой теоремы Эмми Нётер, принимавшей участие в геттингенских дисскусиях о законах сохранения энергии-импульса. К ней обратились за советом вскоре после того, как она переехала в Геттинген в апреле 1915 г. «Я рассчитываю на помощь Эмми Нётер при выяснении вопросов, связанных с моим законом [сохранения] энергии...»,— писал Гильберт Клейну [K4]. «Как Вы знаете, госпожа Нётер продолжает помогать мне в работе»,— писал Клейн Гильберту [K4]. В то время сама Нётер рассказывала другу о том, что геттингенская группа, к которой она принадлежит, занимается исключительно трудными расчетами, нужными Эйнштейну, по «...ни один из нас не понимает, зачем они» [D1]. Ее собственная работа о взаимосвязи между инвариантностью относительно группы непрерывных преобразований и законами сохранения была опубликована в 1918 г. [N3]. Теорема Нётер стала необходимым инструментом современной теоретической физики. В упомянутой работе Нётер эта теорема — лишь своего рода побочный результат. После ее смерти Эйнштейн писал: «По отзывам наиболее компетентных из ныне живущих математиков, фрейлейн Эмми Нётер входила в число самых значительных и самых творческих гениев математики, появившихся с тех пор, как женщины стали получать высшее образование» [E18].

Но вернемся к октябрьской статье Эйнштейна 1916 г. Основным содержанием этой работы являются не столько дифференциальные, сколько интегральные законы сохранения. Теперь хорошо известно, что проблема отнюдь не тривиальна. Уравнение (15.3) можно записать в эквивалентной форме следующим образом:

$$\partial\left(\sqrt{-g}\,T_{\mu}^{\nu}\right)/\partial x^{\nu} - (1/2)\sqrt{-g}\,T^{\alpha\beta}\partial g_{\alpha\beta}/\partial x^{\mu} = 0. \qquad (15.6)$$

Второй член, соответствующий возможности обмена энергией-импульсом между гравитационным полем и веществом, усложняет переход от дифференциальных законов к интегральным путем простого интегрирования по пространственной области. Эйнштейн нашел решение этой технической задачи — он первым переписал уравнение (15.6) так, чтобы дивергенция стала равна нулю [E16]. Он указал, что поскольку скаляр кривизны R линеен относительно вторых производных $g_{\mu\nu}$, можно единственным образом определить величину R^*, зависящую только от $g_{\mu\nu}$ и их первых производных, задав соотношение

$$\int R\sqrt{-g}\,d^4x = \int R^* d^4x + \text{выражение для поверхности.} \qquad (15.7)$$

Определим величину t_{μ}^{ν} следующим образом:

$$t_{\mu}^{\nu} = \frac{1}{2}\left(R^*\delta_{\mu}^{\nu} - \frac{\partial R^*}{\partial\left(\partial g^{\alpha\beta}/\partial x^{\mu}\right)}\frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_{\nu}}\right). \qquad (15.8)$$

Легко показать, что при помощи уравнений гравитационного поля уравнение (15.6) записывается в другой форме:

$$\partial\left(\sqrt{-g}\,T_{\nu}^{\mu}+t_{\nu}^{\mu}\right)/\partial x^{\mu}=0, \tag{15.9}$$

поэтому выражение

$$P_{\mu}\equiv\int\left(\sqrt{-g}\,T_{\mu}^{4}+t_{\mu}^{4}\right)d^{3}x \tag{15.10}$$

можно определить как полную энергию-импульс замкнутой системы. Эйнштейн подчеркивал, что, несмотря на внешний вид, уравнение (15.9) полностью ковариантно. Однако величина t_{μ}^{ν} не является общековариантной тензорной плотностью; она представляет собой тензор лишь относительно аффинных преобразований.

Эти результаты особо интересны потому, что они демонстрируют, как уверенно, бесстрашно и изобретательно обращался Эйнштейн с римановой геометрией. В те годы он занимался трудными математическими вопросами лишь тогда, когда его вынуждала к этому физика. Я живо представляю, как он говорит: «Общая теория относительности верна, но необходимо придать смысл полной энергии и импульсу замкнутой системы. Постараюсь это сделать». По-моему, не случайно в октябрьской статье 1916 г. Эйнштейн идет от уравнения (15.9) к уравнению (15.6), а не наоборот! За подробностями вывода уравнения (15.9) и за доказательством того, что t_{μ}^{ν} есть аффинный тензор, я отсылаю читателя к обзорной статье Паули [P1, разд. 23 или 27]. Псевдотензор энергии-импульса обсуждается в книге Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [L5].

Вывод уравнения (15.9) ознаменовал открытие новой главы в разработке ОТО. Сразу же возникли новые проблемы: поскольку t_{μ}^{ν} не является общей тензорной плотностью, до какой степени определения энергии и импульса не зависят от выбора системы координат? В течение последующих двух лет этот вопрос обсуждался Феликсом Клейном, Леви-Чивитой, Лоренцем, Паули, Шрёдингером и другими [18]), а также самим Эйнштейном, который в 1918 г. вновь вернулся к этому вопросу. «...Почти все сомневаются в [уравнении (15.9)]»,— писал он. Эйнштейн указал, что величине t_{μ}^{ν} можно присваивать произвольные значения в любой заданной точке, но, тем не менее, интегрирование энергии и импульса по всей пространственной области позволяет полностью определить их значения [E19a]. Дальнейшие исследования показали, что величина P_{μ} полностью определена, когда метрика соответствующим образом приближается к метрике Минковского на пространственной бесконечности.

После смерти Эйнштейна с новой энергией продолжается изучение многих сопутствующих вопросов. Например, можно ли

---

[18]) Эти ранние работы обсуждаются Паули [P1, разд. 61]. См. также [E19].

рассчитать энергию в конечной области? Можно ли разделить энергию на гравитационную и негравитационную компоненты? Существует ли чисто гравитационная энергия? Всегда ли полная энергия тяготеющей системы положительна? О том, насколько удалось продвинуться вперед в решении этих проблем (многие из них еще остаются открытыми), рассказано в статье Траутмана [T2]. Последний из перечисленных вопросов задавался на пленарном заседании конференции GR9. Эта трудная проблема («программа положительной энергии») возникает потому, что значение P^{ν}_{μ} само по себе не является положительно определенным. Однако в 1979 г. было обнаружено, что можно все-таки показать положительную определенность полной энергии [S10]. Вернувшись с конференции, я узнал, что доказательство, данное в [S10], можно существенно упростить [W10].

§ 15.4. Гравитационные волны

Слушая лекции о современном состоянии подготовки экспериментов по обнаружению гравитационных волн, прочитанные на пленарных заседаниях GR9 Кипом Торном из Пасадены и Владимиром Борисовичем Брагинским из Москвы, я ясно осознал, насколько ОТО принадлежит будущему. До сих пор гравитационные волны обнаружить не удалось, но Торн надеется, что они будут зарегистрированы в нашем веке. Пятнадцать групп экспериментаторов, многие из них многонациональные, готовятся к этому событию.

Ни одна из этих групп не собирается идти по пути Герца, открывшего электромагнитные волны в наземных экспериментах. Вероятность атомного перехода, сопровождающегося гравитационным излучением, примерно в 10^{50} раз меньше вероятности испускания фотона. Поэтому наиболее подходящие источники гравитационного излучения приходится искать в космосе, обращая внимание на мощные и редкие экзотические звездные явления, такие, как коллапс центральных областей звезд с последующим превращением их в нейтронные звезды или сверхновые или же образование черных дыр. Интенсивность таких источников может в 10^{50} раз превысить достижимую на Земле. Актуальна задача создания таких гравитационных антенн, при помощи которых можно было бы решить сложнейшую проблему отделения сигнала от фона. Ведется работа и над акустическими детекторами, над усовершенствованными стержнями — резонаторами Вебера (названными по имени Иозефа Вебера, пионерские работы которого, выполненные в 60-е годы, во многом стимулировали ведущиеся сейчас во всем мире работы [W11]), монокристаллами и электромагнитными детекторами, такими, как лазерные интерферометры. На этих установках предполагается исследовать диапазон частот от 100 Гц до 10 кГц. Планируется также использовать для поиска гравитационных волн (в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-4} Гц) межпланетные зонды, т. е. наблюдать доплеров-

ский сдвиг частот. При разработке детекторов широко применяется бурно развивающаяся новая отрасль техники — квантовая электроника [C1]. Специалисты надеются не просто обнаружить гравитационные волны, но и применять их в астрономии. При прохождении через вещество эти волны должны поглощаться и рассеиваться в значительно меньшей степени, чем даже нейтрино. Поэтому они, возможно, представляют собой наилучший из доступных способов проникновения в глубь сверхплотного вещества космических объектов. Ожидается, что гравитационноволновая астрономия даст информацию о динамике эволюции центральных областей сверхновых, нейтронных звезд и черных дыр. Кроме того, с помощью гравитационных волн, возможно, будут получены экспериментальные данные, которые позволят нам сделать выбор между ортодоксальной общей теорией относительности Эйнштейна и некоторыми ее современными вариантами.

Более подробное изложение всех этих чрезвычайно интересных и открывающих широкие перспективы вопросов физики гравитационных волн, а также ссылки на соответствующую литературу можно найти в книгах, перечисленных в начале главы. Особо отмечу труды семинара 1978 г. [S2], главу, написанную Вебером в книге [H2], главы Дугласа и В. Б. Брагинского, а также Уилла в книге [H1], «обзор обзоров», опубликованный в 1980 г. Торном [T3]. Из всех этих работ хорошо видно, как укрепляется взаимосвязь ОТО с астрофизикой и физикой частиц и насколько быстро развиваются численные методы в теории относительности благодаря постоянно совершенствующейся вычислительной технике.

Эйнштейн получил также квадрупольную формулу.

Еще до создания теории относительности Лоренц предположил в 1900 г., что гравитация «...может распространяться со скоростью, не большей скорости света» [L6]. Термин *гравитационная волна* (onde gravifique) был впервые введен Пуанкаре в 1905 г. при обсуждении им расширения лоренц-инвариантности и применении ее к тяготению [P2]. В июне 1916 г. Эйнштейн первым облачил эти качественные представления в конкретную форму [E20]. Он использовал приближение для слабого поля:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \tag{15.11}$$

где $\eta_{\mu\nu}$ — метрика Минковского, $|h_{\mu\nu}| \ll 1$, а членами более высокого порядка, чем первый, относительно $h_{\mu\nu}$ пренебрегают. Эйнштейн показал, что при отсутствии источников величины

$$h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - (1/2)\,\eta_{\mu\nu} h^{\alpha}_{\alpha} \tag{15.12}$$

удовлетворяют выражению ($\Box$ — даламбертиан)]

$$\Box\, h'_{\mu\nu} = 0 \tag{15.13}$$

в системе координат, в которой выполняется «калибровочное условие»

$$\partial h'_{\mu\nu}/\partial x^{\nu} = 0. \qquad (15.14)$$

(Уравнение (15.14) иногда называют условием Гильберта, поскольку Гильберт первым показал, что в общем случае уравнение (15.14) может всегда выполняться для величин первого порядка относительно $h_{\mu\nu}$ [H5].)

Эйнштейн не только указал, что в приближении слабого поля происходит излучение гравитационных волн, движущихся со скоростью света, но и отметил, что лишь две из десяти величин $h_{\mu\nu}$ имеют самостоятельный физический смысл, или, как принято говорить сейчас, есть только два спиральных состояния. Он также подчеркнул, что существование стабильных внутриатомных орбит, на которых не происходит излучения, одинаково загадочно как с точки зрения электромагнетизма, так и с точки зрения тяготения! «...По-видимому, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации». Может быть, эта новая встреча с квантовой физикой подстегнула его мысль, и несколько месяцев спустя Эйнштейн получил один из самых значительных результатов в квантовой электродинамике: осенью 1916 г. он ввел понятие спонтанных и индуцированных переходов и дал новый вывод закона излучения Планка [E21].

В обсуждавшейся выше июньской статье 1916 г. Эйнштейн попытался также рассчитать гравитационную энергию, излучаемую возбужденной изолированной механической системой линейным размером R.

Он ввел два следующих приближения: 1) учитываются лишь те длины волн λ, для которых $\lambda/R \gg 1$; 2) внутренние скорости в механической системе много меньше скорости света. В то время Эйнштейн ошибочно считал, что механическая система, постоянно сохраняющая сферическую симметрию, может излучать гравитационные волны. В 1918 г. он исправил ошибку и вывел квадрупольную формулу [E22]: потеря энергии механической системой задается следующим выражением [19]):

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^5}\sum_{i,j}\dddot{Q}_{ij}\dddot{Q}_{ij}, \qquad (15.15)$$

где

$$Q_{ij} = \int \rho\,[x_i x_j - (1/3)\,\delta_{ij} r^2]\,d^3x \qquad (15.16)$$

— квадрупольный момент массы, ρ — плотность массы источника,

[19]) В результате, полученном Эйнштейном, отсутствует множитель 2. Эта ошибка исправлена в уравнении (15.15), записанном в более современном виде. Точки означают дифференцирование по времени. Уравнение (15.15) представляет собой, очевидно, только основной член в разложении в ряд выражения для гравитационного мультиполя. Об этом разложении говорится в [T4].

После 1918 г. Эйнштейн еще раз вернулся к гравитационным волнам. В 1937 г. он вместе с Розеном исследовал цилиндрические волновые решения точных уравнений гравитационного поля [E23], которые затем анализировались в работе [W12].

Существуют ли гравитационные волны? Верен ли вывод квадрупольной формулы? Если да, то справедлива ли она в упоминавшихся выше экстремальных условиях, в которых могут проявляться источники наиболее мощного гравитационного излучения?

На эту тему имеется обширная и серьезная литература [20]), в которой предпринимаются попытки ответить на поставленные вопросы; первым свое мнение высказал в 1922 г. Эддингтон, считавший, что гравитационные волны не имеют физической реальности и «...распространяются... со скоростью мысли» [E24]. В 1937 г. Эйнштейн тоже на короткое время засомневался в их существовании (гл. 28). «Практически все современные физики-теоретики считают, что гравитационное излучение существует»,— читаем мы в [H1, с. 90]. На конференции GR9 справедливость квадрупольной формулы обсуждалась в лекции на пленарном заседании, а также в последующей дискуссии. В конце 1980 г. была опубликована статья, которую можно назвать «вкладом в дискуссию по поводу справедливости квадрупольной формулы Эйнштейна» [W13].

Ответить на поставленные выше вопросы трудно, потому что гравитация по своей природе, вообще говоря, нелинейна, а этот аспект не учитывается в линейном приближении Эйнштейна. Никто не сомневается в справедливости уравнения (15.15) (для диапазона длинных волн и медленных перемещений) применительно к негравитационным источникам гравитационных волн, таким как упруго колеблющиеся стержни. Гораздо труднее определить, что происходит, когда в качестве источников гравитационных волн рассматриваются совместно материальные тела и само гравитационное поле. Трудность частично связана с локализацией энергии, о чем шла речь в предыдущем параграфе. Современная оценка этих трудностей приведена в [E25, R2]. Более оптимистические взгляды на проблему изложены в работе [T5]. Сам я не настолько знаком с указанными проблемами, чтобы принимать чью-либо сторону [21]).

«Даром небес» явилось открытие двойного пульсара PSR 1913 + 16, «первой известной системы, в которой релятивистское тяготение может практически использоваться для определения астрофизических параметров» [W14]. Эта система позволяет проверить справедливость количественного расчета по

---

[20]) О современном состоянии дел см. написанную К. Торном главу «Gravitational Radiation» в книге «300 Years of Gravitation»/S. Hawking, W. Israel, Eds.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987.— *Примеч. пер.*

[21]) Выражаю благодарность Ю. Эльерсу и И. Хавасу за полезное для меня обсуждение этой группы проблем.

ОТО изменения периода обращения из-за потери энергии в результате излучения гравитационных волн. На конференции GR9 сообщалось, что эта потеря энергии отличается от результата расчета по квадрупольной формуле в $(1{,}04 \pm 0{,}13)$ раз. Этот результат, конечно, не полностью подтверждает справедливость квадрупольной формулы и не снимает с повестки дня вопрос о непосредственном наблюдении гравитационных волн. Однако полученный из наблюдений двойного пульсара результат, видимо, отражает реальное положение, так что релятивистские экспериментальные работы по обнаружению гравитационных волн ведутся не напрасно.

§ 15.5. Космология

> Неограниченности пространства свойственна гораздо большая эмпирическая достоверность, чем какому бы то ни было другому продукту внешнего восприятия. Но отсюда никоим образом не следует бесконечность пространства [22]).
>
> *Б. Риман, 1854 г.*

Эйнштейн и Мах. В феврале 1916 г., когда Эйнштейн работал над первым обзором по ОТО, он узнал, что Мах завершил свой земной путь. Эйнштейн прервал работу и написал небольшую статью о Махе [E26], поступившую в редакцию журнала «Naturwissenschaften» неделей раньше, чем обзор по ОТО в журнал «Annalen der Physik». Статья о Махе — это не обычный некролог. В ней впервые проявилось редкостное умение Эйнштейна с глубоким пониманием нарисовать портрет ученого, описать его деятельность, охарактеризовать время, в которое он работал, справедливо оценить как успехи, так и неудачи.

Эрнст Мах был сначала профессором математики, затем экспериментальной физики и, наконец, философии. В некрологе Эйнштейн подчеркнул заслуги Маха во многих областях, но особенно высоко он оценил сделанный Махом исторический и критический анализ механики [M6]. Этот труд, с которым Эйнштейна познакомил Бессо [E28], оказал на него в студенческие годы огромное влияние [E27]. Эйнштейн вновь изучал его в Берне вместе с друзьями по «Академии Олимпия» [S11]. В 1909 г. он писал Маху, что из всех его трудов наиболее глубокое впечатление на него произвела именно эта книга [E29] [23]). Вначале Мах благосклонно отнесся к теории относительности, судя по то-

---

[22]) Из лекции, прочитанной Риманом 10 июня 1854 г. Ее текст на русском языке приведен в сборнике: Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— *Примеч. пер.*

[23]) До нас дошли четыре письма, написанных Эйнштейном Маху, но ни одного письма Маха Эйнштейну. Эти письма обсуждаются в работах [H7, H8]; там же более подробно рассказано и об отношениях между ними.

му, что Эйнштейн писал ему вновь в 1909 г.: «Я очень рад, что Вам нравится теория относительности» [E30]. В некрологе Эйнштейн подробно процитировал знаменитые замечания Маха по поводу ньютоновой концепции абсолютного пространства и абсолютного движения и заключил: «Приведенные строки показывают, что Мах ясно понимал слабые стороны классической механики и был недалек от того, чтобы прийти к общей теории относительности. И это [почти] за полвека до ее создания!» [E26]. В своем классическом труде Мах действительно критиковал положение Ньютона о том, что можно провести различие между абсолютным и относительным вращательным движением. «Я не могу согласиться с такой точкой зрения. По моему мнению, существует только относительное движение, и поэтому я не вижу никакой разницы между вращательным и поступательным движением»,— писал он [M6, англ. пер., с. 542, 543][24]). Эйнштейн, очевидно, помнил о точке зрения Маха на вращательное движение, когда писал свой обзор 1916 г.: вторая часть, озаглавленная «Об основаниях, которые подсказывают расширение постулата относительности», начинается со следующей фразы: «Классической механике и в не меньшей степени специальной теории относительности присущ некоторый теоретико-познавательный недостаток [выделенность равномерного прямолинейного движения среди всех других типов относительного движения], который, пожалуй, впервые ясно отмечен Э. Махом» [E6].

В 1910 г. Мах положительно отозвался о работах Лоренца, Эйнштейна и Минковского [M7]. В январе 1913 г. Эйнштейн писал Маху о том, что ему очень приятно было узнать о «дружеском интересе», который тот проявляет к новой теории — теории Эйнштейна — Гроссмана [E32]. Однако позднее Мах изменил свое отношение к теории относительности. В июле 1913 г. он писал: «Я должен со всей определенностью отвергнуть мнение о том, что я являюсь предшественником релятивистов, а также заявить, что не разделяю распространенной сейчас атомистической веры»,— и добавил, что, по его мнению, теория относительности «...становится все более и более догматичной» [M8]. Эти фразы приводятся в книге, опубликованной лишь в 1921 г. Но, несмотря ни на что, Эйнштейн продолжал высоко ценить Маха. «Несомненно, что такая реакция Маха была следствием преклонного возраста, снизившего возможности его восприятия, поскольку весь ход рассуждений данной теории соответствует ходу рассуждений Маха, поэтому его по праву можно считать предшественником общей теории относительности»,— писал он в 1930 г. [E33]. В последнем своем интервью, за две недели до смерти, Эйнштейн с видимым удовольствием вспоминал о встрече

---

[24]) Если читатель желает освежить в памяти опыт Ньютона с вращающимся ведром и анализ этого опыта, данный Махом, он может обратиться, например, к работе [W2, с. 16, 17]. В феврале 1916 г. Эйнштейн прочитал лекцию о маятнике Фуко [E31].

с Махом и говорил о четырех ученых, которыми он восхищался: о Ньютоне, Лоренце, Планке и Махе [C2]. Только их с Максвеллом и никого другого Эйнштейн считал своими подлинными предшественниками.

Укажем, в чем именно проявилось влияние Маха на Эйнштейна.

Во-первых, отметим, что Мах акцентировал внимание на относительности любого движения. Как мы только что видели, это всегда вызывало восхищение у Эйнштейна.

Во-вторых, отметим философию Маха, вернее, его научную методологию. «Мах боролся против догматизма физики XIX в. и победил его»,— так звучит одно из немногих одобрительных высказываний Эйнштейна о философской позиции Маха [E34]. В 1922 г., выступая на философской конференции, Эйнштейн сказал: «Система Маха [заключается] в изучении взаимосвязей между экспериментальными данными; по Маху, наука есть совокупность этих взаимосвязей. Это негодная точка зрения; по сути, то, что предложил Мах, есть не система, а каталог. Насколько Мах был хорошим специалистом в области механики, настолько он был жалким философом. Такой близорукий подход к науке привел его к отрицанию существования атомов. Если бы Мах был жив сегодня, возможно, он придерживался бы другого мнения» [E35]. Отрицательное отношение Эйнштейна к философии Маха с годами нисколько не изменилось, так же как осталось неизменным его восхищение механикой Маха. Незадолго до смерти «...Эйнштейн сказал, что он всегда считал создание научных концепций и построение на их основе теорий одним из созидательных способностей человеческого разума. Такая точка зрения была полностью противоположна подходу Маха, считавшего законы науки лишь экономным способом изложения большого количества фактов» [C2] [25]).

В-третьих, отметим, что гипотеза Маха о динамическом происхождении инерции привела Эйнштейна к написанию работ по космологии.

Эйнштейн и принцип Маха. Основным нововведением в механике Маха стал отказ от понятия абсолютного пространства при формулировке закона инерции. Запишем этот закон следующим образом: система, на которую не действуют никакие силы, находится либо в покое, либо в состоянии равномерного прямолинейного движения по отношению к X. Тогда

X = абсолютное пространство — Ньютон

X = идеализированное представление о неподвижных звездах как о жесткой системе — Мах

[25]) В «Автобиографических заметках» Эйнштейн упоминает о том, что, создавая СТО, он критически размышлял о достижениях прошлого, опираясь прежде всего на философские труды Маха [E27]. Осмелюсь предположить, что и здесь Эйнштейн имеет в виду механику Маха.

«Когда... мы говорим, что некое тело сохраняет неизменными скорость и направление своего движения *в пространстве*, то подразумеваем, что это краткое утверждение относится ко *всей Вселенной*» [M6, гл. 2, разд. 6]. Так выразился Мах, курсив также принадлежит ему. Далее он утверждал, что отнесение ко всей Вселенной можно ограничить массивными телами на больших расстояниях, которые образуют жесткую систему неподвижных звезд, так как перемещения по отношению к близким телам взаимно компенсируются.

Затем Мах ставит новую проблему (см. также [H9]). Закон инерции Ньютона относится к движениям, равномерным по отношению к абсолютному пространству; этот закон является *аксиоматическим принципом кинематики*. По мнению же Маха, закон инерции есть закон движения тел по отношению к неподвижным звездам. Не следует ли поэтому искать *динамическое объяснение* такого движения, точно так же как динамически объясняются орбиты планет или относительное движение заряженных частиц, описываемое электродинамикой? Это не цитата из Маха, однако такой динамический подход ощущается в его вопросе: «Что станет с законом инерции, если небеса в целом придут в движение, а звезды начнут беспорядочно метаться? Как тогда применять этот закон? Как он будет выглядеть?.. Только если вся Вселенная распадется на части, мы поймем, что *все тела* в равной степени важны для выполнения закона инерции» [M9]. В книге Маха не говорится о том, *как* на практике учесть вклад со стороны каждого тела; он не предложил конкретной динамической схемы своего нового толкования закона инерции. Он открыл закон инерции Маха, а не принцип Маха. Читая его работу, невольно вспоминаешь святое писание. Текст достаточно ясен, но исподволь чувствуешь, что слова имеют более глубокий, скрытый смысл, хотя, возможно, это впечатление и ошибочно. Посмотрим, как понял слова Маха Эйнштейн.

Вскоре после того, как Эйнштейн переехал в Прагу и, наконец, после долгого перерыва вернулся к рассмотрению проблем тяготения, он опубликовал короткую заметку, озаглавленную «Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электромагнитной индукции?» [E36]. В этой работе (основанной на рудиментарной теории тяготения пражского периода) Эйнштейн показал, что если полая массивная сфера испытывает ускорение вдоль оси, проходящей через ее центр, то инертная масса материальной точки, расположенной в центре сферы, возрастает; это явление как бы предвосхищает эффект Лензе — Тиррринга [T6].

И тут на сцену выходит Мах.

В своей заметке Эйнштейн заявляет: «Это наводит на мысль о том, что инерция материальной точки *полностью* обусловлена воздействием всех остальных масс посредством некоторого рода взаимодействия с ними... Это полностью совпадает с точкой зрения, выдвинутой Э. Махом в его остроумных исследованиях по этому вопросу». С этого момента такие высказывания о Махе

повторяются неоднократно. В статье Эйнштейна и Гроссмана читаем: «[наша теория] согласуется со смелой мыслью Маха о том, что причиной инерции является взаимодействие рассматриваемой материальной точки со всеми остальными [массами]» [E37]. В июне 1913 г. Эйнштейн написал Маху об эффекте индукции, а также об искривлении лучей света и добавил, что если эти эффекты будут обнаружены, то они послужат «...блестящим подтверждением данного Вами мастерского анализа основ механики» [E38]. В лекции, прочитанной в Вене осенью 1913 г., Эйнштейн вновь упомянул о подходе Маха к инерции и назвал его «гипотезой об относительности инерции» [E39]. После этого ни данная гипотеза, ни проблема инерции не упоминаются в работах Эйнштейна до февраля 1917 г., когда он представил статью [E40], открывшую новую область исследований в физике — релятивистскую космологию.

За несколько дней до представления этой работы в Прусскую академию наук Эйнштейн сообщил Эренфесту: «Я... опять набрел в теории тяготения на нечто такое, за что меня могут упечь в сумасшедший дом» [E41]. В самой статье Эйнштейн упоминает об «извилистом и неровном пути», который ему пришлось пройти до создания первой космологической модели новой эры — изотропной однородной безграничной, но пространственно замкнутой стационарной Вселенной. На создание этой теории у Эйнштейна, видимо, ушло немало времени, поскольку еще в сентябре 1916 г. де Ситтер упомянул о разговоре с Эйнштейном о «полностью материальном происхождении инерции» и осуществлении этой идеи на практике в виде создания модели «мира, который по необходимости должен быть замкнутым» [S12].

Несомненно, что именно идеи Маха вдохновили Эйнштейна на эту статью. Однако работа начинается с повторного рассмотрения другой проблемы — трудностей, возникающих в связи со стационарной Вселенной Ньютона [26]). Как указал Эйнштейн, уравнение Ньютона — Пуассона

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \tag{15.17}$$

допускает только такую (среднюю) плотность ρ, которая должна стремиться к нулю быстрее, чем $1/r^2$ при $r \to \infty$, так как в противном случае гравитационный потенциал будет бесконечным, а сила, действующая на частицу и обусловленная воздействием всех масс Вселенной, станет неопределенной. (Вскоре он пришел к выводу, что это рассуждение неверно [E41a].) Эйнштейн также утверждал, что если даже φ будет оставаться конечным при больших r, все равно возникнут затруднения, поскольку больцмановский закон равновесного распределения нельзя будет применить к звездам, если их полная энергия больше той, кото-

---

[26]) Более подробно о космологии XIX в. и литературе, посвященной этому вопросу, см. в [P7; N1, гл. 2]. Полный обзор приведен в [M1; M2, с. 752—762].

рая требуется для перемещения звезды на бесконечность в результате столкновений с другими звездами в течение бесконечного времени существования Вселенной. В то же время Эйнштейн отметил, что если вместо уравнения (15.17) записать

$$\Delta\varphi - \lambda\varphi = 4\pi G\rho \tag{15.18}$$

(что также основано на представлениях XIX в.), где ρ — равномерно распределенная плотность, то решение

$$\varphi = -(4\pi G/\lambda)\rho \tag{15.19}$$

будет динамически приемлемым.

Приемлемо ли оно также физически? Постоянство ρ соответствует изотропной и однородной Вселенной. В 1917 г. ученые считали, что Вселенная состоит из нашей Галактики и, предположительно, пустоты вокруг нее. Тогда еще не было установлено, что туманность Андромеды расположена вне Млечного Пути. Сейчас отдельная галактика считается локальным возмущением распределения, являющегося в действительности настолько изотропным и однородным, что этот факт сам по себе требует объяснения [S13]. Вводя предположение об изотропности и однородности, Эйнштейн не опирался на физические факты, за исключением того, что, по его мнению, эти предположения впервые приводили к реализации в предлагаемой им модели принципа относительности инерции. Статичность модели совершенно естественна для того времени, так как в 1917 г. еще не было известно о крупномасштабных перемещениях галактик.

Но вернемся к переходу от уравнения (15.17) к уравнению (15.18). В работе Эйнштейна можно выделить три основных момента. Во-первых, он осуществляет тот же переход, что и в ОТО, т. е. заменяет

$$R_{\mu\nu} - (1/2)\, g_{\mu\nu}R = -\varkappa T_{\mu\nu} \tag{15.20}$$

выражением

$$R_{\mu\nu} - (1/2)\, g_{\mu\nu}R - \lambda g_{\mu\nu} = -\varkappa T_{\mu\nu}. \tag{15.21}$$

Во-вторых, он дает решение уравнения (15.21), разрешающее проблемы с ньютоновой бесконечностью. В-третьих, он предлагает динамическую реализацию принципа относительности инерции. От его решения — Вселенной Эйнштейна — через несколько лет пришлось отказаться, но тем не менее, о нем будут помнить, как о первом серьезном предложении, касающемся новой топологии мира в целом. Посмотрим, как он к нему пришел.

Эйнштейн с большим успехом применил уравнение (15.20) к движению планет, предположив, что на большом удалении от их орбит метрика плоская. Теперь он выдвинул две причины, по которым это граничное условие не годится для Вселенной в целом. Во-первых, остается нерешенной старая проблема ньютоновой бесконечности. Во-вторых (и здесь вновь на сцену выходит Мах), условие неискривленности пространства предпола-

гает, что «...хотя материя (находящаяся на конечном расстоянии) и *влияет* на инерцию [тела], но все-таки *не обусловливает* последнюю. Если бы существовала только одна материальная точка, то она ... обладала бы ... инерцией ... но в последовательной теории относительности нельзя определять инерцию по отношению к „пространству", но можно определять инерцию масс относительно друг друга». Так Эйнштейн начал придавать конкретную форму идеям Маха: поскольку величины $g_{\mu\nu}$ обусловливают действие инерции, они должны, в свою очередь, *полностью* определяться распределением масс во Вселенной. Эйнштейн не видел, как применить уравнение (15.20) и одновременно выполнить поставленную цель. А вот уравнение (15.21), как ему казалось [27]), позволяло это сделать в виде следующего решения ($i, k = 1, 2, 3$):

$$g_{ik} = \delta_{ik} + x_i x_k \Big/ \left(r^2 - \sum x_i^2\right), \quad g_{i4} = 0, \quad g_{44} = -1 \qquad (15.22)$$

при условии

$$\lambda = 1/r^2 = (1/2)\varkappa\rho c^2 = 4\pi G\rho/c^2, \qquad (15.23)$$

где ρ — постоянная плотность. Во Вселенной Эйнштейна ньютонова бесконечность более не вызывает проблем, так как ее нет — трехмерное пространство сферически замкнуто и имеет не зависящую от времени кривизну. Более того, если нет материи, то нет и инерции, т. е. для *не равных нулю* λ уравнение (15.21) не выполняется, если $\rho = 0$. Конечно, такое решение не связывает непосредственно инерцию с удаленными звездами, но и это казалось Эйнштейну неплохим началом.

В то время Эйнштейн настолько верил в принцип относительности инерции, что в 1918 г. провозгласил одинаково важными следующие три принципа, на которых должна строиться удовлетворительная теория тяготения [E42]:

1) принцип относительности, воплощенный в общей ковариантности;

2) принцип эквивалентности;

3) принцип Маха (здесь впервые в литературе упоминается этот термин): «G-поле *полностью* определено массами тел», т. е. величины $g_{\mu\nu}$ полностью определены массами тел или, в общем случае, тензором $T_{\mu\nu}$. В 1922 г. Эйнштейн заметил, что другие ученые готовы двигаться вперед, не используя этот критерий, и добавил: «Будущим поколениям, однако, эта нетребовательность покажется непонятной» [E42a].

Позднее Эйнштейн стал относиться к принципу Маха с гораздо меньшим энтузиазмом и в конце концов вообще от него отказался. В заключение приведу краткую хронологию следующих работ Эйнштейна по космологии.

---

[27]) Он также отметил, что для данного уравнения выполняются законы сохранения, так как $g_{\mu\nu;\,\rho} = 0$.

1917 г. Хотя Эйнштейн прямо не заявил этого, естественно предположить, что, по его мнению, верные уравнения вообще не должны иметь решения в отсутствие материи. Однако сразу же после выхода в свет его статьи де Ситтер нашел решение уравнения (15.21) для $\rho = 0$ [S14; W12, с. 613]. Таким образом, космологический член не исключает наличия «инерции по отношению к пространству». Наверняка Эйнштейн был сильно огорчен, так как в 1918 г. он искал способ опровергнуть решение де Ситтера [E42], но вскоре убедился, что оно верно.

1919 г. Эйнштейн высказал предположение о том, что, возможно, электрически заряженные частицы удерживаются вместе силами тяготения [E43]. Он начал с уравнения (15.21), предположил, что наличие тензора $T_{\mu\nu}$ связано исключительно с электромагнетизмом, так что $T^{\mu}_{\mu} = 0$, и показал, что отсюда следует условие для следа $\lambda = R/4$. Таким образом, электромагнетизм ограничивает тяготение. Эту идею можно считать первой попыткой Эйнштейна построить единую теорию поля. В 1927 г. он написал короткую заметку о математических свойствах этой модели [E44]. На этом все заканчивается, что довольно типично для Эйнштейна в более поздние годы: ему приходит в голову какая-то мысль, появляется соответствующая публикация, после чего идея исчезает бесследно.

1922 г. А. А. Фридман показал, что уравнение (15.20) допускает нестационарные решения для изотропного однородного распределения вещества, что соответствует расширяющейся Вселенной [F1]. Эйнштейн сначала счел использованный А. А. Фридманом подход неверным [E45], но затем нашел ошибку в своих возражениях [E46] и назвал результаты Фридмана «проливающими новый свет».

1923 г. Вейль и Эддингтон обнаружили, что в мире де Ситтера пробные частицы разбегаются. В результате Эйнштейн написал Вейлю: «Если нет квазистатического мира, то долой космологический член» [E47].

1931 г. Упомянув о теоретических результатах Фридмана, полученных «...независимо от наблюдаемых фактов», и об экспериментальных открытиях Хаббла, с которыми «...общая теория относительности, по-видимому, естественно (т. е. без λ-члена) согласуется», Эйнштейн окончательно отказался от космологического члена, «...явно неудовлетворительного с теоретической точки зрения» [E48]. В 1932 г. Эйнштейн и де Ситтер совместно сделали аналогичное заявление [E49]. Больше он никогда не использовал λ-член [E50].

1954 г. Эйнштейн написал одному из коллег: «Кстати, о принципе Маха вообще больше говорить не стоит» [E51].

На деле все оказалось не так. После Эйнштейна принцип Маха сошел с авансцены, но не был полностью забыт. В постэйнштейновские времена, когда возрос интерес к ОТО, он стал важной темой исследований. На конференции GR9 проходила дискуссия и по этому вопросу, в частности, обсуждалось, что

следует понимать под этим принципом. Вокруг него кипят страсти, я даже слышал, что журнал «Zeitschrift für Physik» не принимает больше к рассмотрению статей по ОТО, так как работы о принципе Маха вызывают слишком много полемических откликов. Так, обсуждается, приемлема ли теория только тогда, когда данный принцип включен в нее в качестве фундаментального требования (что и имел в виду Эйнштейн в 1918 г.), или же этот принцип должен выступать в качестве критерия отбора решений в теории, допускающей также и немаховы решения[28]). Мне кажется, по сей день принцип Маха не позволил сколько-нибудь продвинуть вперед физическую науку. Кроме того, по моему мнению, проблема происхождения инерции была и остается *наиболее* темным вопросом в теории частиц и полей. Поэтому у принципа Маха, возможно, есть будущее, но не в отрыве от квантовой теории.

§ 15.6. Сингулярности; проблема движения

В 1917 г. Эйнштейн писал Вейлю: «Вопрос о том, следует ли рассматривать электрон как особую точку и допустимы ли вообще в физическом описании истинные сингулярности, представляет огромный интерес. В теории Максвелла радиус принимают конечным для того, чтобы объяснить конечность инерции электрона» [E52]. Возможно, еще тогда, и уж наверняка позже, Эйнштейн не сомневался (за исключением краткого периода) в том, что ответ на этот вопрос таков: сингулярности — проклятие. Он был настолько уверен в недопустимости существования сингулярностей, что опубликовал работу, имевшую целью показать, что «...шварцшильдовская сингулярность [при $r = 2GM/c^2$] отсутствует [в природе], так как вещество нельзя концентрировать произвольным образом; в противном случае частицы, образующие скопление, достигнут скорости света» [E53][29]). Эта статья была написана в 1939 г. за два месяца до представления работы Оппенгеймера и Снайдера о коллапсе звезд [O3]. К сожалению, я не знаю, как реагировал на эту работу Эйнштейн. Что касается теории «большого взрыва», то последние слова его на эту тему были таковы: «Мы не можем предположить, что уравнения поля остаются справедливыми при больших плотностях поля и материи, и не можем заключить, что „начало расширения“ должно означать сингулярность в математическом смысле» [E50, с. 129]. Очень может быть, что в данном отношении он был прав.

---

[28]) Подробно о различных вариантах этого принципа говорится в работе [G1]; там же приведен обзор соответствующей литературы.

[29]) На самом деле шварцшильдовская сингулярность не является истинной. Позднее было показано, что решение Шварцшильда есть двулистное многообразие, аналитически полное всюду, кроме точки $r = 0$. Представление о двулистности было впервые введено в 1935 г. Эйнштейном и Розеном [E54], считавшими, однако, сингулярность при $r = 2GM/c^2$ истинной.

Научная задача, которую поставил перед собой Эйнштейн в следующие годы, должна была удовлетворять трем жизненно важным для него условиям: объединять тяготение и электромагнетизм, позволять приходить к квантовой физике как к частному случаю более глубокой теории, основанной на причинности, и описывать частицы как свободные от сингулярностей решения уравнений непрерывных полей. Добавлю несколько слов о последнем условии (единая теория поля и квантовая теория будут обсуждаться в следующих главах). Эйнштейн считал, что введение Максвеллом понятия поля было революционным достижением, идущим все же недостаточно далеко. Он хотел, кроме того, искоренить любые упоминания о ньютоновой механической картине мира и при описании источников электромагнитного поля, а также других полей. В 1931 г. он так изложил свои представления: «Непрерывное поле в одной особой области теоретической физики [в электродинамике] встало наряду с материальной точкой как представитель физической реальности. Этот дуализм не преодолен до сих пор, что должно внушать беспокойство каждому последовательно мыслящему человеку... После Максвелла физическая реальность мыслилась в виде непрерывных, не поддающихся механическому объяснению полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных... Нужно также добавить, что полная реализация этой программной идеи еще не удалась. Удачные физические построения, которые с тех пор выдвигались, скорее представляли собой компромисс между этими двумя программами [Ньютона и Максвелла]. Именно благодаря своему компромиссному характеру они носили печать временности и логической неполноты, хотя в отдельных задачах и приводили к большим успехам» [E55]. Насколько я знаю, именно здесь Эйнштейн наиболее четко изложил свою глубокую веру в возможность описания мира при помощи только непрерывных полей.

Был, однако, краткий период, когда Эйнштейн думал, что иногда появление сингулярностей неизбежно. В 1927 г. он писал: «Все попытки последних лет объяснить элементарные частицы материи посредством непрерывного поля не удались. Подозрение, что это вообще неправильный путь к пониманию частиц материи, после очень многих тщетных попыток стало у нас настолько сильным, что нам не хочется здесь об этом говорить. Таким образом, мы встаем на путь объяснения элементарных частиц как особых точек или сингулярных мировых линий. Итак, мы пришли к... методу рассмотрения, при котором кроме гравитационного и электромагнитного полей отсутствуют другие полевые переменные (с возможным исключением для „космологического члена“ [!]), место которых, однако, занимают особые мировые линии» [E56]. В этой статье, написанной совместно с Яковом Громмером, Эйнштейн впервые касается проблемы движения. Напомним кратко, в чем же заключается эта проблема.

О левой части уравнений гравитационного поля (15.20) нам известно все: $R_{\mu\nu}$ и R являются известными функциями $g_{\mu\nu}$, их производных и ничего более. Знания же о правой части, источнике $T_{\mu\nu}$, по сей день остаются недостаточными. Однако левая часть уравнения (15.20) удовлетворяет тождествам (15.4). Отсюда, из этой *информации, относящейся исключительно к тяготению*, следует, что $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$. Таким образом, ОТО придает новый смысл закону сохранения энергии-импульса: тяготение *само по себе* заставляет вызывающие его источники подчиняться этому закону. Рассмотрим теперь в качестве простейшего источника не имеющую структуры точечную частицу — гравитационный монополь. Его движение с необходимостью ограничивается условием $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$. Возникает следующий вопрос: если учесть эти ограничения, обусловленные только тяготением, то вытекает ли уравнение движения источника лишь из уравнений гравитационного поля? Другими словами, был ли излишним отдельный постулат движения по геодезической, введенный Эйнштейном в 1914 г.? Эйнштейн и Громмер показали, что для слабого внешнего поля тяготения ответ на этот вопрос утвердителен.

Спустя несколько недель Вейль в письме Эйнштейну поблагодарил его за возможность познакомиться с гранками новой работы и «за поддержку» этой новой статьей его «старых идей о материи» [W20]; при этом Вейль сослался на работу, написанную им в 1922 г. [W21], где он пришел к аналогичным выводам. Как было показано, в частности, Хавасом [H10][30]), Эйнштейн независимо от других пришел к проблеме движения, но он не был ни первым, ни единственным ее открывателем.

Ответ Эйнштейна Вейлю представляет особый интерес, поскольку он помогает лучше понять, почему его в то время так занимала данная проблема. «Я придаю всему этому такое большое значение потому, что было бы чрезвычайно важно понять, не опровергаются ли уравнения поля как таковые фактами, установленными в области квантов» [E58]. Напомню, что действие происходит в 1927 г., вскоре после открытий Гейзенберга и Шрёдингера.

Последний крупный цикл работ Эйнштейна в области ОТО также посвящен проблеме движения. Речь идет о статьях, написанных им совместно с Леопольдом Инфельдом и Банешем Хофманом о проблеме движения N тел [E59, E60]. В них поле тяготения уже не считается внешним; вместо этого одновременно рассматривается как само поле, так и его (сингулярные) источники. В работах вводится новое предположение, в соответствии с которым поля не обязательно должны быть слабыми, но скорость движения источников мала по сравнению со скоростью

---

[30]) Статья Хаваса, содержащая также простой вывод результата, полученного Эйнштейном и Громмером,— одна из важных работ по проблеме движения в ее современном виде. Она опубликована в сборнике статей, вышедшем под редакцией Ю. Элерса [E57].

света. Полученный авторами результат не нов; такие же или почти такие же результаты были получены гораздо раньше Лоренцем и Дросте, де Ситтером, Фоком и Леви-Чивитой (Н. Хавас, частное сообщение). Найденные уравнения оказались полезными в тех случаях, когда необходимо учитывать ньютоново взаимодействие. «[Эти уравнения] широко используются при анализе орбит планет в Солнечной системе. Например, в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института ими, в несколько измененном виде, пользуются для расчета эфемерид при высокоточных наблюдениях за планетами и космическими аппаратами» [M2, с. 1095].

В своем докладе на конференции GR9, посвященном проблеме движения, Элерс подчеркнул трудности определения в ОТО изолированных систем, а также указал, что нельзя рассматривать проблему движения в отрыве от других задач. Она должна решаться совместно с такими проблемами, как описание протяженных тел и гравитационного излучения (см. также [E61])[31]). Специалист по физике частиц может к этому добавить, что при решении данной проблемы не следует забывать о наличии у тела комптоновской длины волны, параметра, не играющего большой роли для крупномасштабных тел.

§ 15.7. Еще немного о GR9

Из программы конференции GR9 видно, что все вопросы, обсуждавшиеся в предыдущих параграфах, продолжают представлять огромный интерес. В заключение перечислю другие вопросы, о которых шла речь на конференции. Сейчас точные решения уравнений гравитационного поля исследуются как новыми аналитическими методами, так и с помощью ЭВМ. Среди других классических проблем, по-прежнему вызывающих интерес, следует упомянуть важную задачу Коши[32]). Обсуждались также полученные в последнее время экспериментальные результаты (в частности, обнаружение сильнейшей прецессии пульсара PSR 1913+16) и будущие наземные космические эксперименты, имеющие своей целью проверку ОТО. Проходила дискуссия по релятивистской термодинамике — области, по сей день вызывающей серьезные разногласия. Читались доклады о фундаментальных достижениях в понимании общей структуры теории относительности с особым акцентом на теоремы о сингулярностях, теорию черных дыр и «космическую цензуру». Говорилось, что наилучшей из всех возможных моделей по-прежнему является Вселенная Фридмана, причем не только для нынешней эпохи,

[31]) Например, оказывается, что в приближениях, определяемых уравнениями (15.11)—(15.14), источники движутся с постоянной скоростью (!) [E57].

[32]) Госпожа И. Шоке-Брюа рассказала мне, что Эйнштейн не проявил большого интереса к этой проблеме, когда она захотела обсудить ее с ним.

но и с момента начала отсчета времени. Об этом моменте (в особенности о первых долях секунды) на конференции говорилось в связи с барионной асимметрией во Вселенной. Обсуждались также содержание нейтрино во Вселенной и фоновое излучение с температурой 3 К.

Проходила также дискуссия о квантовой механике в контексте ОТО. Речь шла не только об излучении Хокинга — важном теоретическом результате, полученном в 70-е годы, в соответствии с которым на периферии черных дыр постоянно рождаются частицы, но и о квантовой теории тяготения и супергравитации. Слушая выступления на конференции, особенно по последним двум темам, я очень остро ощущал, сколько еще предстоит сделать в области общей теории относительности.

Глава 16. «ВНЕЗАПНАЯ СЛАВА ДОКТОРА ЭЙНШТЕЙНА»

§ 16.1. Болезнь, новый брак, смерть матери

Четвертая часть книги начиналась с рассказа о приезде Эйнштейна в Берлин, разводе с Милевой, его отношении к первой мировой войне и первых шагах в сфере политики. Затем следовало описание последних этапов создания общей теории относительности. В предыдущей главе обсуждались участие Эйнштейна в дальнейшем развитии этой теории, а также ее воздействие на следующие поколения физиков. В этой главе я коснусь влияния общей теории относительности на мир в целом и отношения к ее творцу как к личности «божественной», вызывающей благоговейный трепет, почтение, а часто и ненависть. Здесь я продолжу рассказ о годах, проведенных в Берлине (§14.1). Вернемся же к началу декабря 1915 г., когда Эйнштейн закончил работу над созданием основ ОТО.

Как я уже упоминал, в декабре 1915 г. Эйнштейн признался своему другу М. Бессо, что он «...доволен, но сильно измотан» [E1]. Отдыхать он, впрочем, не стал. В 1916 г. Эйнштейн написал десять работ, в том числе первый основной обзор по ОТО, статью о спонтанном и индуцированном излучении, первую статью о гравитационных волнах, работы о законах сохранения энергии-импульса и решении Шварцшильда, а также дал новое предложение по измерению эффекта Эйнштейна — де Хааза. Кроме того, он закончил свою первую популярную книгу по теории относительности. Должно быть, отсутствие ухода и слишком большое напряжение стали основной причиной болезни, начавшейся в 1917 г. и длившейся несколько лет.

Я не знаю точно, когда это началось, но еще в феврале 1917 г. Эйнштейн писал Эренфесту, что не сможет приехать в Голландию из-за болезни печени, которая принуждает его соблюдать строжайшую диету и вести размеренную жизнь [E2]. Болезнь, однако, не помешала ему в том же месяце закончить основополагающую работу по релятивистской космологии. Лоренц выразил сожаление по поводу того, что Эйнштейн не может приехать. «Впрочем,— писал он,— после напряженной работы последних лет Вы заслужили отдых» [L1]. Ответ Эйнштейна показывает,

что его недомогание было не пустячным. Он упоминает, что может придерживаться диеты только благодаря тому, что его семья в Берлине поддерживает связь с родственниками на юге Германии и добавляет: «Без этой помощи я не мог бы оставаться здесь; вообще, не знаю, сколько это все протянется» [E3]. Как гражданин Швейцарии он имел право получать оттуда посылки с продуктами [E4], но, очевидно, они не компенсировали нехватку продовольствия, вызванную войной. Тем не менее, Эйнштейн не послушал своего врача, который советовал ему поехать на поправку в Швейцарию [E5].

В этот период инициативу в свои руки взяла Эльза Эйнштейн-Ловенталь. Эльза родилась в 1876 г. в Гехингене (Гогенцоллерн) и приходилась Альберту двоюродной сестрой по материнской линии и троюродной по отцовской. Ее отец Рудольф был двоюродным братом Германа, отца Эйнштейна. Фанни, ее мать, была родной сестрой Паулины, матери Альберта. Эльза и Альберт знали друг друга с детства, с тех времен, когда Эльза приезжала погостить в Мюнхен, а Альберт — в Гехинген. Они были очень привязаны друг к другу. Двадцати с небольшим лет Эльза вышла замуж за торговца по фамилии Ловенталь и родила двух дочерей: Ильзе (1897) и Марго (1899). Недолгий этот брак закончился разводом. Эйнштейн появился в Берлине, когда Эльза с дочерьми жила на верхнем этаже дома № 5 по Габерландштрассе. В том же доме, ниже, жили ее родители. Одной из причин, удерживающих Эйнштейна в Берлине, было присутствие там Эльзы.

Именно она чаще всего ухаживала за двоюродным братом. Летом 1917 г. Эйнштейн переехал с Виттельсбахерштрассе в квартиру на одной площадке с Эльзой. В сентябре он пригласил Бессо навестить его в новой просторной и удобной квартире [E6]. В декабре он писал Цангеру, что чувствует себя гораздо лучше: «С лета я поправился на четыре фунта, и все это благодаря заботе Эльзы. Она сама мне все готовит; без этого не обойтись» [E7]. Но, несмотря на это, ему необходимо было соблюдать строгую диету, и он опасался, что острые боли возобновятся [E8].

К концу года здоровье Эйнштейна опять ухудшилось. Выяснилось, что у него язва желудка [E9, E10]. Несколько месяцев он провел в постели [E10]. Настроение у него упало. «Мой дух слабеет, силы убывают» [E11]. Тем не менее, он вывел квадрупольную формулу для гравитационного излучения. В апреле 1918 г. врачи разрешили ему выходить из дома, но советовали соблюдать осторожность. «Недавно у меня случился сильный приступ, который, по-видимому, был вызван лишь тем, что я час поиграл на скрипке» [E10]. В мае Эйнштейн вновь серьезно заболел, на этот раз желтухой [E12], но это не помешало ему закончить фундаментальный труд о псевдотензоре энергии-импульса. В августе ему приснилось, что он перерезал себе горло опасной бритвой [E13]; возможно, этот сон был вызван болезненным состоянием. Тем не менее, в ноябре Эйнштейн опубликовал

статью о парадоксе часов. В декабре он написал Эренфесту, что здоровье его подорвано навсегда [E14].

К этому времени Альберт и Эльза решили пожениться. Эйнштейну необходимо было получить развод [E15]. Постановление суда о разводе датировано 14 февраля 1919 г. Там указано, что в свое время Милева должна получить деньги, которые Эйнштейн получит как Нобелевский лауреат (гл. 29).

Милева прожила в Цюрихе до конца своих дней. Поначалу она приняла свою девичью фамилию, Марич, но постановлением кантонального правительства Цюриха от 24 декабря 1924 г. ей было разрешено вновь носить фамилию Эйнштейн. Навещая иногда детей, Эйнштейн останавливался у нее. У Милевы был трудный характер, она была недоверчива и подвержена приступам меланхолии. (Ее сестра Зорка страдала тяжелой формой психического заболевания.) Умерла она в 1948 г. Через несколько лет после ее смерти Эйнштейн писал: «Она так и не примирилась с разводом, и ситуация все больше напоминала классическую историю с Медеей, что омрачило мои отношения с обоими сыновьями, к которым я был нежно привязан. Этот трагический аспект наших отношений оставался неизменным до самой старости» [E16].

Альберт и Эльза сочетались браком 2 июня 1919 г. Ему было сорок, ей — сорок три. Они поселились в квартире Эльзы, к которой добавили две комнаты этажом выше, предназначавшиеся для работы и отдыха Эйнштейна. Иногда у него вновь случались приступы желудочных болей [E17], но в 1920 г. он писал Бессо, что находится в хорошей форме и прекрасном настроении [E18]. Пожалуй, самым примечательным в его болезни было отсутствие перерыва в научной работе.

Добрая, сердечная, по-матерински заботливая, словом, типичная бюргерша, Эльза обожала опекать своего «Альбертля». Она купалась в лучах его славы. Чарли Чаплин, который познакомился с ней в 1931 г., так описал ее: «Из этой женщины с квадратной фигурой так и била жизненная сила. Она откровенно наслаждалась величием своего мужа и вовсе этого не скрывала, ее энтузиазм даже подкупал» [C1]. Прекрасные отношения ее дочерей с новым мужем также способствовали счастью Эльзы. Кочевник Альберт нашел свой дом, и отчасти это пошло ему на пользу. Он любил, чтобы о нем заботились, и обожал принимать гостей: ученых, актеров, дипломатов... И все же иногда такая жизнь бывала ему в тягость. Один из друзей так описывает Эйнштейна в тот период: «Он, в котором всегда было что-то богемное, зажил жизнью буржуа средней руки... в доме, типичном для состоятельной берлинской семьи... с красивой мебелью, коврами и картинами... Войдя, вы ощущали, что он тут чужой, как представитель богемы в гостях у буржуа» [F1, нем. изд., с. 106]. А вот что рассказывала о своей жизни Эльза: «В детстве я влюбилась в Альберта, потому что он так прекрасно играл на скрипке Моцарта... Еще он играет на рояле. Музыка помогает ему ду-

мать о его теориях. Он поднимается в свой кабинет, потом возвращается в гостиную, берет несколько аккордов, записывает что-то, снова возвращается в кабинет. В такие дни мы с Марго стараемся ему не мешать. Мы незаметно ставим ему еду и достаем пальто. Иногда он даже в холод выходит из дому без пальто и шляпы. Потом возвращается, и вот уже на лестнице слышны его шаги» [S1]. Мне кажется, что между ними не было большой близости. Спальня Эльзы была расположена рядом с той, которую занимали ее дочери; спальня Альберта находилась дальше по коридору [H1]. Не похоже, чтобы в их семье было принято совместно строить планы и принимать решения. «Желания Альберта трудно предугадать»,— написала однажды Эльза Эренфесту [E19]. Эльзу, в отличие от Альберта, заботили положение в обществе и мнение окружающих [1]).

Иногда Эйнштейн вскользь делал замечания, которые говорят о его сдержанном отношении к священному институту брака. Однажды, к примеру, кто-то, заметив, что он постоянно чистит трубку, спросил, для чего он курит, ради удовольствия или ради процесса чистки и набивания трубки? Эйнштейн ответил: «Моя цель — курение, но в результате все засоряется. Так и в жизни, особенно в браке» [I1].

Вскоре после смерти Эльзы, в 1936 г., Эйнштейн писал Борну: «Я здесь прекрасно устроился, живу, как медведь в берлоге, и чувствую себя „в своей тарелке", как никогда прежде в моей полной событиями жизни. Эта привязанность к „берлоге" особенно возросла после смерти моей подруги [Kameradin]; она была более привязана к людям, чем я» [E20]. Это не единственный случай, когда в высказываниях Эйнштейна о семье было больше откровенности, чем такта [E21].

В марте 1955 г., вскоре после смерти Мишеля Бессо, с которым Эйнштейн был дружен всю жизнь, он писал его семье: «Больше всего меня восхищала его способность жить долгие годы не только в мире, но и в подлинном согласии с женщиной — эту задачу я дважды пытался решить и оба раза с позором провалился» [E22].

Через полгода после того, как Альберт и Эльза поженились, мать Альберта приехала в Берлин — ей хотелось умереть в доме сына.

Жизнь Паулины была нелегкой. После смерти мужа, последовавшей в 1902 г., она осталась с очень незначительными средствами и без доходов. Поначалу она перебралась к сестре Фанни в Гехинген. После этого долгое время прожила в Хейльброне, в доме вдовца-банкира по фамилии Оппенгеймер, занимаясь хозяйством и присматривая за детьми, которые ее обожали. Потом она некоторое время жила с овдовевшим братом Якобом и вела его хозяйство, затем переехала в Люцерн к дочери Майе, кото-

[1]) Франк отмечает, что она не пользовалась любовью в берлинском обществе [F1, нем. изд., с. 106].

рая с мужем Паулем Винтелером занимали дом на Брамбергштрассе, 16а. Именно на этот адрес Эйнштейн послал вырезку из газеты «...для того, чтобы маме было чем питать свою (и так, впрочем, развитую) материнскую гордость» [E23].

Живя у дочери, Паулина тяжело заболела — у нее обнаружился рак желудка. Ее пришлось поместить в санаторий Розенау. Вскоре после поступления туда она выразила желание переехать к сыну. В декабре 1919 г. Эльза писала Эренфесту, что смертельно больная мать будет перевезена к ним [E24]. В начале года Паулину привезли в Берлин. Ее сопровождали Майя, врач и сиделка [E25]. Паулину устроили в кабинете Эйнштейна. Морфий повлиял на ее рассудок, но, как писал Эйнштейн, «она цеплялась за жизнь и была по-прежнему красива» [E25]. Умерла она в феврале. Похоронили Паулину на Шонебергском кладбище в Берлине. Вскоре после ее смерти Эйнштейн писал Цангеру: «Моя мать умерла... Мы все без сил... Теперь я на собственной шкуре испытал, что такое кровные узы» [E26].

§ 16.2. Канонизация Эйнштейна

В начале осени 1919 г., находясь в санатории, Паулина Эйнштейн получила от сына открытку, которая начиналась так: «Дорогая мама, сегодня я узнал радостную новость. Г. А. Лоренц прислал телеграмму, в которой говорится, что английские экспедиции зарегистрировали отклонение лучей света, проходящих около Солнца» [E27]. Телеграмма, которую послал Лоренц, гласила: «Эддингтон обнаружил смещение звезд у края Солнца, предварительные измерения между девятью десятыми секунды и вдвое большим значением, поздравляю» [L2]. Это было неофициальное сообщение; ничего еще не было известно наверняка. И все же Эйнштейн почти сразу послал краткое сообщение в «Общество естествоиспытателей» только для того, чтобы сообщить о полученной телеграмме [E28]. Он был очень взволнован.

Напомним вкратце, как изменялся подход Эйнштейна к проблеме искривления лучей света. 1907 г.: служащий патентного бюро в Берне устанавливает принцип эквивалентности, обнаруживает, что из него непосредственно следует вывод об искривлении лучей света, но считает, что из-за малости этот эффект наблюдать нельзя. 1911 г.: профессор Пражского университета догадывается, что данный эффект *можно* наблюдать при прохождении света звезд около Солнца во время полного затмения, и, рассчитав смещение, получает значение 0,87″. Тогда Эйнштейн не знал, что пространство искривлено, и поэтому полученный им результат неверен. Он еще не отказался от представлений Ньютона, считавшего пространство плоским; из своего закона всемирного тяготения и корпускулярной теории света Ньютон и сам мог бы получить значение 0,87″ (носящее название значения Ньютона). 1912 г.: профессор Цюрихского университета устанавливает, что пространство искривлено. Лишь через несколь-

ко лет он осознает, что учет кривизны пространства влияет на смещение лучей света. 1915 г.: член Прусской академии наук обнаруживает, что по общей теории относительности искривление света, проходящего около Солнца, должно составлять 1,74″; таково значение Эйнштейна, вдвое большее значения Ньютона. Этот равный двум множитель позволяет установить, какая из соперничающих теорий верна — Ньютона или Эйнштейна.

В 1914 г., до того как был получен правильный ответ, Эйнштейн написал Бессо со свойственной ему уверенностью: «Я более не сомневаюсь в справедливости всей теории, независимо от того, увенчаются ли успехом наблюдения солнечного затмения» [E29]. Зигзаги истории несколько раз позволяли ему избежать неприятной ситуации, когда полученный им неверный еще результат вступил бы в противоречие с опытными данными. Аргентинской экспедиции, направившейся в 1912 г. в Бразилию с целью наблюдения солнечного затмения и имевшей в программе наблюдений отклонение лучей света, помешали ливни. Летом 1914 г. немецкая экспедиция, возглавляемая Эрвином Фрейндлихом и финансируемая Густавом Круппом, выступившим на сей раз в непривычной ему роли благодетеля человечества, направилась в Крым, чтобы наблюдать затмение 21 августа. (В газетах сообщалось, что русским солдатам и крестьянам правительство объявило, что бояться дурного предзнаменования нечего — затмение Солнца есть природное явление [N1].) Но тут началась война, и членам экспедиции было предложено вернуться. Некоторые из них так и поступили, а те, кто колебался, были арестованы, потом в конце концов добрались домой, но, естественно, без результатов [N2]. Неудачи продолжались и после 18 ноября 1915 г., когда Эйнштейн опубликовал правильное значение смещения 1,74″ [E30]. Через десять дней Эйнштейн написал Зоммерфельду, комментируя новое предложение Фрейндлиха по обнаружению искривления лучей света: «Только интриги жалких людишек мешают провести эту последнюю, новую и важную проверку теории». Письмо было подписано: «Ваш разъяренный Эйнштейн», что совсем не похоже на него [E31]. Возможность наблюдения солнечного затмения в 1916 г. в Венесуэле также была упущена из-за войны. Первые попытки определить смещение по фотографиям, сделанным во время предыдущих затмений, ни к чему не привели. Попытки американцев измерить этот эффект во время затмения 1918 г. не дали убедительных результатов[2]). Только в мае 1919 г. две британские экспедиции получили первые фотографии, по которым можно было что-то определить, и лишь в ноябре 1919 г. результаты были объявлены официально.

У английских ученых интерес к искривлению лучей света возник вскоре после того, как экземпляры работ Эйнштейна по

---

[2]) Читатели, интересующиеся подробностями этих первых попыток, могут найти их в [E32].

ОТО были посланы из Голландии де Ситтером в Кембридж Артуру Стэнли Эддингтону (очевидно, это были первые работы по теории относительности, попавшие в Англию). Распространению идей Эйнштейна способствовало превосходное эссе де Ситтера, опубликованное в июньском номере журнала «Observatory» [S2], и три его крупные работы, напечатанные в «Monthly Notices» [S3]. Той же цели послужил и последовавший за ними доклад Эддингтона [E33], который на заседании Королевского астрономического общества в феврале 1917 г. подчеркнул важность обнаружения отклонения лучей света [E34]. В марте 1917 г. Королевский астроном сэр Фрэнк Уотсон Дайсон указал на очень удачное расположение звезд 29 мая 1919 г. (в день следующего затмения Солнца), которое облегчит обнаружение предполагаемого отклонения лучей света, и добавил: «Г-н Хинкс любезно согласился узнать, какие из обсерваторий можно будет использовать» [D1]. Были организованы две экспедиции, одна в Собраль в Бразилии, возглавляемая Эндрю Кроммелином из Гринвичской обсерватории, другая — на остров Принсипи, рядом с побережьем Испанской Гвинеи, возглавляемая Эддингтоном. Перед отъездом Эддингтон писал: «Эти экспедиции либо впервые докажут, что свет имеет вес [т. е. дадут значение Ньютона], либо подтвердят фантастическую теорию неевклидова пространства, выдвигаемую Эйнштейном, либо принесут результаты, которые будут иметь еще более далеко идущие последствия — покажут всякое отсутствие искривления» [E35]. В июньском выпуске «Observatory» под рубрикой «В последнюю минуту» были опубликованы две телеграммы, одна из Собраля: «Затмение превосходно. Кроммелин», вторая из Принсипи: «Облачно. Есть надежды. Эддингтон» [O1]. После возвращения экспедиций началась обработка данных [3]). Эддингтон в своем предварительном докладе на заседании Британской ассоциации, проходившем в Борнмуте 9—13 сентября, сообщил, что лучи света отклонялись на угол от 0,87″ до значения, вдвое большего. Эти сведения дошли до Лоренца [4]). Лоренц тут же телеграфировал Эйнштейну, которого сообщение взволновало — это неудивительно, ведь он ждал его семь лет. Затем настало 6 ноября 1919 г., день, когда Эйнштейн был канонизирован [5]).

---

[3]) Я не буду здесь касаться деталей наблюдений, а также результатов первичной обработки данных, равно как и их последующего анализа. Об этом говорится в прекрасных статьях [B1, E32, M1].

[4]) Об этом ему сообщил ван дер Пол, присутствовавший на заседании в Борнмуте [L3].

[5]) Весьма соблазнительно провести здесь параллель с беатификацией и канонизацией, хотя в данном случае речь идет о живом человеке. Отмечу, что то или иное лицо может признаваться «блаженным» в какой-то епархии или какой-либо группой людей (в данном случае физиков). Канонизированная личность почитается всеми. [Здесь и ниже автор применяет ряд понятий, нуждающихся в пояснении. «Беатификация» в католической церкви есть присвоение прихожанину названия «блаженного» (beatus) в том случае, когда установлено, что «... при жизни или по смерти он творил

После 1905 г., совершив два первоклассных чуда, Эйнштейн стал «блаженным». Состоявшееся 6 ноября 1919 г. совместное заседание Королевского общества и Королевского астрономического общества напоминало обряд конгрегации [6]). В качестве постулатора выступал Дайсон, которому помогали адвокаты-прокураторы Кроммелин и Эддингтон. Выступавший первым Дайсон в заключение сказал: «После тщательного изучения фотопластинок я готов заявить, что расчеты Эйнштейна подтверждены. Получен совершенно определенный результат, в соответствии с которым свет отклоняется согласно закону тяготения Эйнштейна». С дальнейшими разъяснениями выступил Кроммелин, после чего слово взял Эддингтон, заявивший, что результаты, полученные на Принсипи, подтверждают данные экспедиции в Собраль, и перечислил два несомненно установленных чуда, сотворенных Эйнштейном уже в ранге «блаженного»: объяснение смещения перигелия Меркурия и искривления лучей света на угол $(1{,}98 \pm 0{,}30)''$ и $(1{,}61 \pm 0{,}30)''$; такие результаты были получены соответственно в Собрале и на Принсипи. «Адвокат дьявола» Людвик Зильберштейн [7]) выдвинул критические замечания: «Пока нет достаточных оснований утверждать, что искривление лучей света, наличие которого я признаю, вызывается тяготением». Он также требовал подтвердить наличие красного смещения: «Если красное смещение не удастся обнаружить (как было до сих пор), вся теория рухнет». Указывая на висящий в зале портрет Ньютона, Зильберштейн воззвал к конгрегации: «Память об этом великом человеке заставляет нас с огромной осторожностью относиться к попыткам изменить или полностью пересмотреть его закон тяготения».

Председательствовавший на заседании президент Королевского общества кавалер ордена «За заслуги» Джозеф Джон Томсон, выслушав петицию «instanter, instantius, instantissime», провозгласил буллу канонизации: «Это самый важный результат, полученный в теории тяготения со времен Ньютона, и весьма символично, что о нем объявлено на заседании общества, столь

чудеса. „Блаженный" признается только местно чтимым святым» (Энциклопедический словарь Брокгауза и Эфрона.— Спб., 1895.— Т. 27.— С. 305). Обряд конгрегации сводится к заслушиванию «компетентными судьями» «дела» того или иного лица, представленного к канонизации (причислению к лику святых) — этапу, следующему за беатификацией. «Дело» представляется постулатором, которому помогают адвокаты-прокураторы; в их обязанности входит представление свидетельств совершения «чудес» будущим святым. Специально назначаемое лицо, так называемый «адвокат дьявола» (advocatus diaboli) должен ставить под сомнение заявления постулатора и адвокатов-прокураторов. После установления «святости» глава католической церкви заслушивает троекратную петицию «instanter, instantius, instantissime» (быстро, быстрее, как можно быстрее) произвести причисление к лику святых, что и делается папой особой буллой.— *Примеч. пер.*]

[6]) Отчет об этом заседании приводится в журнале «Observatory» [02].

[7]) Зильберштейн — уроженец Польши, переехавший в Англию и позднее осевший в США,— написал о теории относительности три книги. В ряде случаев он упрямо, но умно выдвигал возражения против этой теории.

тесно связанного с именем великого ученого... Этот результат — одно из высочайших достижений человеческого разума». Спустя несколько недель он добавил: «Обнаружение отклонения лучей света веществом, которое предполагал еще Ньютон в своем первом Вопросе [вынесен в эпиграф к § 11.2.— *Пер.*], само по себе было бы научным результатом первостепенного значения; сейчас это событие приобретает еще большую важность, потому что значение отклонения подтверждает закон тяготения, открытый Эйнштейном» [T1].

Еще до 6 ноября Эйнштейн и другие уже знали, что все идет хорошо. Так, 22 октября член Прусской академии наук физиолог Карл Штумпф писал Эйнштейну: «Примите самые сердечные поздравления по поводу нового грандиозного успеха Вашей теории тяготения. Всей душой мы разделяем ту радость, которую Вы должны испытывать, и гордимся тем, что после военно-политического краха Германии ее наука смогла добиться такой победы...» [S4][8]). Эйнштейн ответил ему 3 ноября: «Вернувшись из Голландии, я обнаружил Ваше поздравление... В Лейдене я узнал, что Эддингтон получил также и количественное подтверждение» [E36]. Через несколько дней после совместного заседания, состоявшегося 6 ноября, Лоренц направил Эйнштейну еще одну телеграмму, подтверждавшую предыдущую [L4]. Так, с 7 ноября 1919 г. начала создаваться легенда об Эйнштейне.

§ 16.3. Рождение легенды

«Условия перемирия и договора», «Немцев призывают в Париж», «Опустошенная Франция», «Успехи реконструкции», «Военные преступления против Сербии» — такими заголовками пестрела 11-я страница лондонской «Times» от 7 ноября 1919 г. На 12-й странице — такие заголовки: «Слава павшим», «Обращение короля к народу в „День перемирия“»; «Работа прервана на две минуты», а в шестой колонке читаем: «Революция в науке», «Новая теория строения Вселенной», «Отказ от взглядов Ньютона». Посередине колонки подзаголовок: «Пространство искривлено». Так лондонская «Times» первой поведала измученному войной миру о том, что происходило на совместном заседании Королевских обществ. На следующий день та же газета опубликовала статью, озаглавленную «Революция в науке. Эйнштейн против Ньютона. Мнения выдающихся физиков». В статье читаем: «Эта тема была вчера предметом оживленной беседы в Палате общин, где сэр Джозеф Лармор, член Королевского общества, депутат парламента от Кембриджского университета... заявил, что его забрасывают вопросами, правда ли, что Ньютон

[8]) Благодарю А. Германа, сообщившего мне, что берлинские газеты стали публиковать предварительные сообщения еще в октябре. Статья А. Мошковского, опубликованная в «Berliner Tageblatt» 8 октября 1919 г., видимо, основывалась на информации, полученной от самого Эйнштейна.

„свергнут", а с Кембриджем „покончено"». (Сотни людей не смогли даже близко подойти к аудитории в Кембридже, где Эддингтон выступал с сообщением о новых результатах [E37].) Новость была тут же подхвачена прессой Нидерландов [N3a, A1]. В газетах печатались комментарии известных физиков. Лоренц, с присущей ему ясностью изложения, объяснял общую теорию относительности читателям газеты «Niewe Rotterdamsche Courant» 19 ноября, заметив, что «...не может не выразить удивления по поводу жалоб на непонятность новой теории. Очевидно, книга Эйнштейна „О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)" не попала в Англию во время войны»[9]). В газете «Frankfurter Allgemeine Zeitung» 23 ноября появилась статья Макса Борна «Пространство, время, тяготение». Заметка Фрейндлиха в «Die Vossische Zeitung» (Берлин) от 30 ноября начиналась так: «В Германии это небывалое научное событие еще не вызвало того отклика, которого оно заслуживает». Впрочем, еженедельная «Berliner Illustrirte Zeitung» 14 декабря поместила фотографию Эйнштейна на первой полосе с заголовком: «Альберт Эйнштейн — новый гигант мировой истории; его исследования, приведшие к полному перевороту в наших представлениях о природе, можно сравнить с открытиями Коперника, Кеплера и Ньютона». Насколько мне известно, первые публикации в Швейцарии появились 10 декабря — это заметка в «Neue Züricher Zeitung», где сообщается, что астроном Анри Деландр выступил на заседании Французской Академии наук 8 декабря и сообщил о результатах наблюдений затмения 29 мая. Он резюмировал содержание теории Эйнштейна, заявив, что энергия притягивает энергию.

Сам Эйнштейн с радостью принял предложение написать статью для лондонской «Times» (была опубликована 28 ноября), ибо это позволяло ему выразить благодарность английским астрономам и физикам «...после печального периода, когда прервалось активное общение между учеными...»: «С великими и благородными традициями науки в вашей стране полностью согласуется то, что выдающиеся ученые должны были отдать много времени и сил... чтобы проверить смысл теории, которая была закончена и опубликована во время войны в стране ваших врагов». Намекая на ранее появившуюся в той же «Times» заметку о себе, Эйнштейн в заключение писал: «Вот еще один пример относительности для развлечения читателей. Сейчас меня в Германии называют „немецким ученым", а в Англии я представлен как „швейцарский еврей". Но если бы мне было уготовано судьбой стать „bête noire" [неугодным], то произошло бы обратное: я оказался бы „швейцарским евреем" для немцев и „немецким ученым" для англичан». В том же номере «Times» была помещена заметка от редакции: «Доктор Эйнштейн руководствовал-

[9]) Эта статья позднее была переведена и напечатана в «New York Times» [N4].

ся благими намерениями, но все же его комплименты беспристрастности английских ученых слишком уж пышны»,— так отреагировала редакция на первое замечание Эйнштейна. Далее в заметке говорилось: «Последняя фраза — это вполне простительная шутка. Однако хотелось бы отметить, что в духе своей теории доктор Эйнштейн не дал абсолютного описания собственной личности». Лучшее изображение Эйнштейна, которое мне случалось видеть,— это фотография на обложке «Berliner Illustrirte Zeitung». На ней мы видим умного, чувственного и впечатлительного человека в состоянии крайнего утомления, чему способствовали и напряженная работа мысли, и болезнь, от которой он только начал оправляться, и смерть матери, происшедшая у него на глазах, и еще, я думаю, суета вокруг него (см. фото II на вклейке).

В печати имя Эйнштейна и понятие относительности встречались и до ноября 1919 г. Франк вспоминает, что в 1912 г. видел венскую газету с заголовком: «Минута в опасности. Сенсация в математике» [F1, нем. изд., с. 290], где явно имелось в виду замедление времени в специальной теории относительности. В 1914 г. Эйнштейн сам написал статью для газеты «Die Vossische Zeitung» [E38], так что он в какой-то степени уже тогда был знаменитостью в немецкоговорящих странах. Всемирно известным он стал только в ноябре 1919 г. Так, в указателе материалов, опубликованных в «New York Times», первое упоминание о нем относится к 9 ноября 1919 г. С того дня не проходило ни одного года, чтобы его имя не упоминалось в этой газете в связи с его научной работой, но чаще в связи с чем-то другим. Таким образом, можно точно определить, когда родилась легенда об Эйнштейне — это произошло 7 ноября 1919 г. после публикации в «Times».

Статья в «New York Times от 9 ноября написана неплохо, но там есть одна неточность. Дж. Дж. Томсон, если верить газете, выразился следующим образом: «Это одно из величайших — *возможно, самое великое* — достижение человечества за всю историю науки». Слов, которые я выделил, Томсон не произносил, но, конечно, так лучше звучит (и возможно, это не так уж далеко от истины). В том же номере помещена передовая под заголовком: «Красные готовили на 7 ноября мировую революцию. Европа ждет эмиссаров Ленина, чтобы начать всеобщее восстание». Здесь же помещена посвященная Эйнштейну колонка, заголовок которой занимал шесть строк: «Свет в небесах перекосился. Ученые не знают, как быть с данными солнечного затмения. Триумф теории Эйнштейна. Звезды оказались не там, где мы думали и где им положено быть, но волноваться нечего. Книга для 12 мудрецов. „Больше ее никто не поймет“,— сказал Эйнштейн, когда бесстрашные издатели взяли его книгу». В статье говорилось, будто один из выступавших на заседании Королевского общества заявил, что с Евклидом покончено (это не соответствовало действительности, но лучше «смотрится»),

а заканчивалась она так: «Когда Эйнштейн предложил издателям свою последнюю крупную работу, он предупредил их, что во всем мире найдется не больше 12 человек, которые ее поймут, но издатели решили рискнуть». Возможно, эту историю выдумал журналист. Я, впрочем, склонен думать, что это высказывание, которое так часто цитируют, принадлежит самому Эйнштейну и относится оно примерно к 1916 г., когда он опубликовал брошюру (в издательстве «Barth» в Лейпциге) и «популярную» книгу по теории относительности (в издательстве «Vieweg» в Брауншвейге). Как бы то ни было, когда в декабре 1919 г. корреспондент «New York Times» брал у него интервью и попросил объяснить его идеи так, чтобы они стали доступны не 12, а большему числу людей, «...доктор добродушно рассмеялся, но стоял на том, что простому человеку понять его будет затруднительно» [N5].

Позднее передовые «New York Times» стали все более подчеркивать ту дистанцию, которая отделяет героя от простого человека,— это необходимо для создания и поддержания мифа. Одиннадцатое ноября: «Новость эта так поразительна, что начинаешь сомневаться даже в таблице умножения... Президенты двух Королевских обществ пытались придать убедительность или хотя бы правдоподобие тому, что свет имеет вес, а пространство — предел. Нет, не имеет и не может иметь, думает средний человек, что бы там ни выдумывали „высшие математики"». Шестнадцатое ноября: «Возможно, эти господа — великие астрономы, но как логики они никуда не годятся. Критически настроенные простые смертные уже заявляли, что ученые, утверждающие, будто у пространства есть предел, обязаны объяснить, что же находится за этим пределом». Восемнадцатое ноября: «New York Times» призвала своих читателей не оскорбляться тем, что только 12 человек могут понять теорию «внезапно прославившегося доктора Эйнштейна». Двадцать пятого ноября в колонке новостей появилась статья под заголовком «Новая физика, основанная на теории Эйнштейна. Сэр Оливер Лодж заявляет, что за ней будущее, а для математиков настанут ужасные времена». Двадцать шестое ноября: редакционная статья «Тяжелые времена для ученых». Двадцать девятое: колонка новостей, озаглавленная «Не понимаю Эйнштейна...», в которой сообщалось, что «...лондонская „Times" сознается в неспособности понять все тонкости теории...». Седьмого декабря в передовой «Посягательство на основы» утверждалось, что «...богохульства в адрес пространства и времени привели некоторых [астрономов] в ужас, и в течение, по крайней мере, нескольких дней им казалось, что рушатся основы человеческого знания». Нельзя, конечно, не заметить, что многие из этих заявлений делались в насмешку. И все же они передают то ощущение таинственности, которое сопровождало замену старых истин новыми. Такие перемены могут внушать страх. Чарлз Пур, профессор небесной механики Колумбийского университета, сказал в интервью «New York

Times»: «В последние годы весь мир находился в состоянии беспокойства, как физического, так и душевного. Возможно, что физический аспект этого беспокойства — война, забастовки, восстание большевиков — являются на самом деле зримыми проявлениями какого-то подспудного, глубокого нарушения, которое имеет всемирный характер... Тот же дух смятения проник и в науку...» [N6].

При попытках объяснить «феномен Эйнштейна» было бы неверно мотивировать различные реакции одним кратковременным, но мощным потрясением, сопровождающим появление чего-то нового. Пресса изо всех сил старалась сохранить ореол таинственности вокруг теории Эйнштейна. Так, в 1928 г. мы вновь читаем в «New York Times»: «Почти всегда, говоря о теории относительности, находят нужным предупредить читателя, что вот это, и это, и то ему даже нечего стараться понять» [N7].

То, что легенда распространилась по всему миру, хорошо видно из докладов немецких дипломатов своему министерству иностранных дел, поступавших из тех стран, куда приезжал Эйнштейн [K1, т. 1, док. 148—160]. Осло, июнь 1920 г.: «Лекции Эйнштейна были необычайно тепло приняты публикой и прессой». Копенгаген, июнь 1920 г.: «В последние дни газеты всех направлений в пространных статьях и интервью подчеркивают значение идей профессора Эйнштейна, „самого знаменитого физика наших дней"». Париж, апрель 1922 г.: «...сенсация, которую не пропустил ни один сноб-интеллектуал столицы». Токио, январь 1923 г.: «Эйнштейна на вокзале встречали такие толпы, что полиция была не в состоянии справиться с опасной давкой... На празднике хризантем ни императрица, ни принц-регент, ни принцы-наследники не привлекали к себе внимания; все вращалось вокруг Эйнштейна». Мадрид, март 1923 г.: «Повсюду большой энтузиазм... каждый день в газетах сообщения о его поездках...». Рио-де-Жанейро, май 1925 г.: «Многочисленные подробные статьи в бразильской прессе...». Монтевидео, июнь 1925 г.: «Все разговоры в городе только о нем, и всю неделю газеты пишут исключительно об Эйнштейне...». Двадцать пятого апреля 1921 г. Эйнштейна, впервые посетившего США, принял президент Гардинг. А вот как очевидец описывает настроение публики во время лекции, которую читал Эйнштейн в венском концертном зале в том же году: «Люди были в состоянии необъяснимого возбуждения, когда уже не имеет значения, что ты понимаешь; важно только, что ты находишься в непосредственной близости от места, где происходят чудеса» [F1, нем. изд., с. 290].

Так продолжалось в течение всей жизни Эйнштейна. Сначала своими научными достижениями он прославился в кругу равных, потом благодаря новой силе XX в.— средствам массовой информации, которые наводнили мир его портретами и описаниями, его узнал весь мир. Среди творений прессы попадались посредственные, но были и удачные (как, например, случилось

с теми «12 мудрецами», которых репортеры превратили в «12 апостолов»). И все же как сама теория Эйнштейна, так и умение газетчиков подать товар лицом были необходимым, но не достаточным условием создания легенды. Сравните, к примеру, «случай Эйнштейна» с другим крупным открытием в физике, которое произвело сенсацию во всем мире благодаря прессе. Я говорю о Рентгене и лучах, открытых им в 1895 г. Тогда в центре внимания было само открытие, а отнюдь не личность ученого. Значимость открытия сохранилась, но его освещение в печати после достижения пика постепенно сошло на нет.

Причина уникального положения Эйнштейна имеет глубокие корни и, на мой взгляд, несомненно, связана со звездами и с языком. Вдруг появляется новая фигура, «внезапно прославившийся доктор Эйнштейн». Он несет откровение о новом строении Вселенной. Он — новый Моисей, сошедший с горы, чтобы установить свой закон; он — новый Иисус, которому подвластно движение небесных тел. Он говорит на непонятном языке, но волхвы уверяют, что звезды подтверждают его правоту. Веками все люди, и дети и взрослые, с восхищением смотрели на звезды и Солнце. Поведайте человечеству о таких открытиях, как рентгеновское излучение или атомы, и оно будет благоговеть перед вами. Что же говорить о звездах, которые всегда были в легендах и мечтах человечества! Их движение свидетельствовало о том, что они не подчиняются воле человека. Непонятные явления в небесах — кометы, затмения — почти всегда считались дурными предзнаменованиями. И вот явился новый человек. Его математический язык таинствен, но его можно растолковать и профанам: четвертое измерение, звезды не там, где нам кажется, но волноваться нечего, свет имеет вес, пространство искривлено. В нем воплощены два сокровенных желания человека — знать и верить, не зная. Драматический эффект его появления усиливается (хотя мне этот фактор кажется второстепенным) и совпадением, вызванным войной,— дата совместного заседания Королевских обществ пришлась на первую годовщину окончания страшных событий близкого прошлого, когда погибли миллионы, пали империи, будущее представлялось, как в тумане. А новый человек, появившийся в это время, олицетворяет силу и порядок. Он θειος ανηρ — богоравный человек XX в.

Я знал его уже в старости, когда слава и известность были источником веселого удивления, а иногда и раздражения для Эйнштейна, принадлежавшего к типу людей, которые не поклоняются никаким святым. Однако в молодости, судя по фотографиям и кинокадрам, он получал удовольствие от встреч с репортерами и восхищения публики. Пытаясь найти способ охарактеризовать его отношение к низкопоклонству, я вспоминаю высказывание лорда Холдейна на вступления к докладу Эйнштейна в одном из колледжей Лондона (Кингз-колледж) 13 ию-

ния 1921 г. Во время этого первого визита в Англию Эйнштейн остановился у Холдейна, чья дочь, увидев знаменитого гостя, от волнения потеряла сознание. Представляя Эйнштейна, он рассказал, как его тронуло, что тот утром отправился в Вестминстерское аббатство на могилу Ньютона. Затем он сказал об Эйнштейне следующее: «Это человек, отмеченный стремлением всегда оставаться в тени и все же вынуждаемый стремиться вперед неодолимой силой гения, силой, ни на минуту не позволяющей личности, которой она овладела, остановиться» [L5].

§ 16.4. Эйнштейн и Германия

В апреле 1914 г. Эйнштейн отправился из Цюриха в Германскую империю с намерением окончательно там обосноваться. В то время Германия еще не воевала. В декабре 1932 г. он покинул Германию навсегда. В промежутке он пережил мировую войну. Империя распалась. В 1919 г., когда Эйнштейн начал приобретать мировую известность, Веймарская республика делала первые неуверенные шаги. Когда он покидал Германию, республика была обречена.

Слава вызывает зависть и ненависть. Эйнштейн не был исключением. В его случае враждебность проявлялась особенно явно, ибо обстановка оставалась тревожной, а он был у всех на виду. В 20-е годы Эйнштейн стал очень заметной личностью, и тому было много причин. Его обожествляли. Он был научным руководителем и видным представителем германского общества. Он много путешествовал — по Европе, Японии, Палестине, Америке. И главное, он был выразителем своих личных, а не государственных взглядов, ратовал за пацифизм и выражал озабоченность по поводу судьбы евреев.

Поведение Эйнштейна как официального лица определялось прежде всего той ролью, которую он играл в науке и которая часто сводилась к выполнению административных обязанностей. Ко всем этим обязанностям он относился добросовестно, а некоторые выполнял даже с удовольствием. В качестве члена знаменитой Прусской академии наук он часто публиковался в ее «Трудах», аккуратно посещал заседания физического отделения, равно как и пленарные заседания, часто работал в различных комитетах и рецензировал сомнительные сообщения, представлявшиеся в «Труды» [K1, т. 1, док. 59—68]. В 1916 г., 5 мая он занял пост президента Немецкого физического общества, который до него занимал М. Планк. С этого времени и до 31 мая 1918 г., когда его сменил Зоммерфельд, Эйнштейн председательствовал на 18 заседаниях общества и несколько раз выступал там с докладами. Наконец, 30 декабря 1916 г. имперским указом он был введен в совет попечителей Физико-технического института, являвшегося государственной организацией, и принимал участие в обсуждении программы исследований [K1, т. 1,

док. 81—87]. Эту должность Эйнштейн занимал до окончательного отъезда из Германии. В 1917 г. он стал директором Института физики им. кайзера Вильгельма; эта должность была чисто административной, так как первоначально задачи института сводились к выделению субсидий на физические исследования в различных университетах [10]). (Исследовательским институт стал уже после отъезда Эйнштейна из Германии.) В 1922 г. решением Академии он был назначен членом совета директоров Потсдамской астрофизической лаборатории [K1, т. 1, с. 22, 54, 58]. В том же году его избрали президентом «Фонда Эйнштейна», занимавшегося финансированием работ по экспериментальной проверке общей теории относительности. Эта организация размещалась в странного вида здании, получившем название «башни Эйнштейна» и расположенном на территории астрофизической лаборатории в Потсдаме. Основным прибором там был «телескоп Эйнштейна», сконструированный специально для экспериментов по физике Солнца. Официальных обязанностей в Берлинском университете у Эйнштейна не было. Иногда он все же проводил там семинары или читал лекции. Кроме того, Эйнштейн чувствовал моральные обязательства по отношению к Цюриху, поэтому прочел там серию лекций с января по июнь 1919 г.

У Эйнштейна была еще одна профессорская должность, в Нидерландах. Королевским указом от 24 июня 1920 г. для него создали специальную кафедру, благодаря чему он мог приезжать в Лейден на короткий срок в удобное для него время. Эйнштейн вступил в эту новую должность 27 октября 1920 г.; тогда же он прочитал лекцию об эфире и теории относительности [11]). Он приезжал в Лейден в ноябре 1921, в мае 1922, в октябре 1924, в феврале 1925 и в апреле 1930 г.; в некоторые из своих приездов читал лекции. Тут он чувствовал себя свободно, мог разгуливать в свитере и в носках [U1]. Первоначально кафедра создавалась на три года, но потом этот период много раз продлевался, и официально о ее закрытии было объявлено 23 сентября 1952 г. [B2].

И все же работа Эйнштейна в 20-е годы не сводилась лишь к администрированию и вступлению в профессорские должности. Он находил удовольствие и в других вещах. Вместе с Мюзамом он измерял диаметр капилляров, с Гольдшмидтом изобрел слуховой аппарат, с Силардом — несколько холодильных уст-

---

[10]) В первые годы только астроном Фрейндлих числился научным сотрудником института. Позднее у администрации (в том числе и у Эйнштейна) были из-за него неприятности [K1, т. 1, с. 22, 54, 58].

[11]) В опубликованном тексте лекции неверно указана дата ее прочтения [E39]. Под эфиром Эйнштейн понимал гравитационное поле (вряд ли такое название удачно). «Эфир общей теории относительности есть среда, сама по себе лишенная *всех* механических и кинематических свойств, но в то же время определяющая механические (и электромагнитные) процессы».

ройств [12]). (Подробнее об этом рассказано в гл. 28.) Но больше всего его по-прежнему интересовали фундаментальные проблемы физики. К этому я вернусь в следующем параграфе, но прежде — несколько замечаний о других интересах Эйнштейна в этот период.

В самом начале первой мировой войны Эйнштейн впервые публично выступил как пацифист. С тех пор он стал активным противником войны. Отношение к его позиции было враждебным. Во время войны начальник штаба Берлинского военного округа письменно обращал внимание шефа полиции Берлина на недопустимость выезда пацифистов за границу. В списке известных пацифистов, приложенном к письму, было и имя Эйнштейна [K1, т. 1, с. 198]. После войны Эйнштейн, призывающий к созданию наднационального образования, стал еще более ненавистен немецким шовинистам.

Сам Эйнштейн расценивал свой пацифизм скорее как инстинкт, а не как плод теоретических рассуждений [N8, с. 98]. В молодости его идеалом было создание Соединенных Штатов Европы. С этой целью он стал активным членом «Союза за новое отечество» (позднее переименованного в «Немецкую лигу борьбы за права человека»), организации, со дня своего основания в 1914 г. призывавшей к созданию Европейского союза. В 1928 г. он стал членом совета ее директоров. В 1923 г. Эйнштейн участвовал в организации общества «Друзей новой России» [K1, т. 1, с. 215]. Эта группа была заинтересована главным образом в культурных связях, что, впрочем, не помешало полиции обратить на нее внимание [K1, т. 1, с. 219]. К концу 20-х годов он стал еще энергичнее проповедовать пацифизм, в частности категорически возражал против службы в армии. Среди множества подписанных им манифестов были и такие, которые требовали всеобщего и полного разоружения. В послании делегатам Интернационала противников войны в 1931 г. Эйнштейн выразил мнение о том, что народам пора, не надеясь на политиков и дипломатов, самим заняться вопросами разоружения [N8, с. 141].

В письме Адамару Эйнштейн замечает, что не взялся бы убеждать отказаться от войн туземцев из африканского племени, «...потому что пациент успеет скончаться до того, как лечение принесет свои плоды» [E40]. Ему понадобилось много времени, чтобы понять, что Европа серьезно больна. (В этом отношении он не был исключением.) В 1932 г. он подписал воззвание к социалистической и коммунистической партиям Германии, призывая их объединиться в борьбе, чтобы предотвратить превращение Германии в «фашистское государство» [K1, т. 1, с. 223], однако даже в мае 1933 г., через три месяца после прихода к власти Гитлера,

---

[12]) У Эйнштейна был также совместно с голландской фирмой «Giro» патент на гирокомпас (немецкий патент 394677) [M2.] Он работал над этим устройством в середине 20-х годов.

дингтон, высказывавшихся в защиту его теории, и резко обрушивался на Ленарда. Эйнштейна можно понять. Ленард был уже на пути к тому, чтобы стать одним из самых презираемых немецких ученых, и все же эта статья явно не принадлежит к лучшим достижениям Эйнштейна и совершенно не похожа на него по стилю. Шестого сентября министр культуры Германии письменно принес ему извинения по поводу событий 24 августа [K1, т. 1, с. 210], а 9 сентября Эйнштейн писал Борну: «Не судите меня слишком строго. Все мы время от времени приносим жертвы на алтарь глупости... что я и сделал, написав эту статью» [E45].

С 19 по 25 сентября в Бад-Наугейме заседало «Общество немецких естествоиспытателей и любителей искусств». Там присутствовали Эйнштейн и Ленард. Судя по официальному протоколу, они вели бесплодные, но вежливые дебаты о теории относительности [E46]. Борн, однако, вспоминал, что Ленард нападал на Эйнштейна злобно и явно как антисемит [B6], а Эйнштейн после пообещал Борну больше никогда так не горячиться [E46a]. Здание, в котором проходили заседания, охранялось вооруженной полицией, но все обошлось без инцидентов [F1, нем. изд., с. 275].

Несомненно, Эйнштейн с легкостью мог бы покинуть Германию и найти превосходную должность где угодно. И все же он не сделал этого, ибо «к Берлину был привязан больше, чем к какому-либо другому месту, человеческими и научными связями» [E46].

В марте 1922 г. по приглашению Коллеж де Франс Эйнштейн приехал в Париж, чтобы обсудить свои работы с физиками, математиками и философами. Отношения между Германией и Францией оставались весьма натянутыми, и эта поездка подверглась критике со стороны как французских, так и немецких националистов. Чтобы избежать демонстраций, Эйнштейн сошел с поезда на какой-то маленькой станции, не доезжая до Парижа [L6]. Вскоре после этой поездки Эйнштейн принял приглашение стать членом Комитета по интеллектуальному сотрудничеству Лиги Наций, и снова Эйнштейн оказался в особом положении. После убийства 24 июня Вальтера Ратенау (еврея и знакомого Эйнштейна), пробывшего всего несколько месяцев на посту министра иностранных дел Германии, 4 июля Эйнштейн написал Марии Кюри, что ему придется выйти из состава Комитета, так как после убийства Ратенау стало ясно: при столь сильных антисемитских настроениях он — неподходящий член Комитета [E47]. Неделю спустя он сообщил ей о своем намерении отказаться от членства Академии и обосноваться где-нибудь просто как частное лицо [E48]. Позднее в том же месяце он привел в качестве причины выхода в отставку свою «...деятельность борца за права евреев и в основном мое еврейское происхождение» [E49]. Его убедили не покидать Академию. В марте 1923 г., вскоре после оккупации района Рура французскими и бельгийскими войсками, он наконец вышел из состава Комитета, заявив, что Лига Наций не обладает ни возможностями, ни доброй волей для выполнения

ее высокого назначения [E50]. В 1924 г. Эйнштейн возобновил работу в Комитете Лиги Наций, так как пришел к выводу, что им «...руководило мимолетное чувство разочарования, а не трезвый подход»[17]) [E51].

Эйнштейн очень остро ощущал все бурные события и ожесточенную борьбу, происходившие в Германии в 20-е годы, поэтому 8 октября 1922 г. он вместе с женой отправился на пять месяцев в путешествие за границу. «После убийства Ратенау я был рад возможности надолго уехать из Германии, покинуть страну, в которой подвергался опасности» [K1, т. 1, с. 231]. После коротких остановок в Коломбо, Сингапуре, Гонконге и Шанхае супруги отправились в Японию, где собирались провести пять недель. В пути Эйнштейн получил сообщение о том, что ему присуждена Нобелевская премия (гл. 29). По дороге домой они провели 12 дней в Палестине, затем побывали в Испании и, наконец, в феврале 1923 г. вернулись в Берлин. В мае — июне 1925 г. они вновь отправились путешествовать, посетив на этот раз Аргентину, Бразилию и Уругвай. Куда бы они ни приезжали, от Сингапура до Монтевидео, повсюду местные еврейские общины устраивали им самый радушный прием.

Можно сказать, что жизнь его была полна. Но вскоре это сказалось на здоровье. В начале 1928 г., находясь в Швейцарии, в Цуоце, Эйнштейн пережил упадок сил, вызванный переутомлением. Врачи нашли у него расширение сердца. При первой же возможности Эйнштейна перевезли в Берлин, где он четыре месяца провел в постели. В конце концов он полностью выздоровел, но испытывал слабость еще почти год. «Иногда даже казалось, что ему нравится болеть, потому что это позволяло ему работать, не отвлекаясь» [R1].

Во время этой болезни, а точнее 13 апреля 1928 г., в секретари к Эйнштейну поступила Элен Дюкас. Со временем она стала не только компетентным секретарем и доверенным лицом, но и членом семьи.

Летом 1929 г. Эйнштейн купил участок земли в деревушке Капут, недалеко от Берлина. Участок находился в нескольких минутах ходьбы от широкой реки Хафель. Тут для его семьи был построен небольшой дом. Накануне ему исполнилось 50 лет[18]), и несколько друзей, чтобы отметить это событие, подарили Эйнштейну яхту. Прогулки на яхте стали одним из его любимых развлечений.

Через некоторое время после выздоровления Эйнштейн вновь отправился в путь. С декабря 1930 по март 1931 г. он работал в Калифорнийском технологическом институте; во второй раз он

---

[17]) В 1927 г. Эйнштейн, Кюри и Лоренц подготовили для Комитета доклад о международном метеорологическом бюро [E52]. Окончательно Эйнштейн вышел из состава Комитета в апреле 1932 г. [D2].

[18]) Берлинский муниципалитет намеревался подарить ему летний домик, но после долгих препирательств (временами отнюдь не забавных) этот план провалился [R1].

приехал туда в декабре 1931 г. и провел в Калифорнии до марта 1932 г.[19]). В это время в Германии дела шли все хуже. В декабре 1932 г. Эйнштейн вновь отправился в Калифорнию. Закрывая дверь своего дома в Капуте, он сказал Эльзе: «Оглянись. Ты видишь все это в последний раз». Так и случилось. О том, что произошло дальше, рассказано в § 25.2.

Рассказ о берлинском периоде я хочу закончить историей, которую слышал от Гарри, «графа Кесслера», хроникера берлинской жизни времен Веймарской республики. Дело было в 1930 г. В Берлин приехал скульптор Майоль. Одним из почетных гостей на обеде в его честь был Эйнштейн. Когда он вошел, Майоль заметил: «Какая красивая голова, это — поэт?» «Пришлось мне,— вспоминает Кесслер,— объяснить ему, кто такой Эйнштейн. Он явно никогда о нем не слышал» [K2].

§ 16.5. Дальнейшие работы

Деятель культуры. Все работы Эйнштейна, опубликованные до окончания работы над ОТО, по характеру представляют собой либо научные статьи, либо обзоры. Исключениями являются только заметка о Планке, написанная в 1913 г. [E53], и рецензии на брошюры о теории относительности Брилла и Лоренца [E53a]. Затем постепенно он начал писать и о других вещах. В период с 1916 по 1920 г. им опубликованы некрологи памяти Маха, Шварцшильда, Смолуховского, Лео Ароиса, а затем несколько обзоров работ других ученых: парижских лекций Лоренца [E54], лекции Гельмгольца о Гёте [E55], книги Вейля по теории относительности [E56]. После 1920 г. перемены стали еще заметней, так как он начал писать об общественных проблемах, политике, образовании. Наиболее важные из этих статей переиздавались в различных сборниках, и я не буду здесь на них останавливаться.

После 1920 г. Эйнштейн довольно часто писал об ученых. Вполне естественно, что именно он написал статьи о Кеплере [E57], Ньютоне [E57a], Максвелле [E58]. В этих работах он подчеркивал фундаментальные вопросы. В других случаях ему явно доставляло удовольствие писать о специальных проблемах, теоретических и экспериментальных, как, например, в статьях о Кельвине [E59] и Варбурге [E60]. Он выступил на похоронах Лоренца, почтил его память и в других выступлениях [E61]. Эйнштейн воздал должное [E62] Эренфесту, Марии Кюри, Перрену, Ланжевену и Планку, а также Джулиусу [E63], Эдисону [E64], Майкельсону [E65] и Нётер [E66]. Он тепло писал об Араго [E67], Ньюкоме [E68] и своем друге Берлинере [E69]. Как я уже упоминал, эти портреты демонстрируют его тонкое понимание людей и тем самым позволяют дорисовать образ самого Эйнштейна. Кро-

[19]) В основном это была заслуга Милликена, который с 1924 г. настойчиво приглашал Эйнштейна в Пасадену [M3].

ме того, эти статьи показывают, что его интерес к физике не ограничивался лишь теми работами, которыми он был занят сам.

В течение всей жизни Эйнштейн интересовался философией. В школьные годы он читал Канта. В Берне вместе с друзьями проштудировал «Этику» Спинозы, трактат Юма о человеческой природе, систему логики Милла, критику чистого опыта Авенариуса и другие философские работы. В первой главе я уже заметил, что, назвав Эйнштейна философом, мы скажем о нем не больше, чем назвав музыкантом. «Не правда ли, вся философия похожа на попытки писать на меду? Все выглядит прекрасно, но через несколько мгновений ничего нельзя разобрать — на поверхности остаются лишь волнистые следы»,— сказал однажды Эйнштейн [R2].

Хотя влияние трудов Эйнштейна на философию было весьма значительным (как и его интерес к ней), ни одну его работу нельзя назвать в полном смысле слова философской. Однако после 1920 г. он иногда писал предисловия к философским работам или их обзоры. Из его обзоров книг Вейнберга [E70] и Винтерница [E71], посвященных теории познания, можно видеть, что он был знаком с трудами Канта. Это же подтверждают записи его бесед с французскими философами в 1922 г. Когда один из них высказал предположение о наличии связи между идеями Эйнштейна и представлениями Канта, Эйнштейн ответил: «Что касается философии Канта, то я думаю, у каждого философа свой собственный Кант... Произвольные концепции, несомненно, необходимы для создания науки, но я не могу ничего сказать о том, заданы ли эти концепции a priori или же они есть произвольные договоренности» [E72].

Из предисловия, написанного Эйнштейном к новому переводу «Диалога» Галилея [E73], видно, что он читал Платона. Он написал также предисловие к новому немецкому переводу «О природе вещей» Лукреция [E74]. Эйнштейн был знаком с теорией познания Бертрана Рассела [E75]. Об интересе Эйнштейна к философии можно судить и по рецензии на книгу Эмиля Мейерсона «Релятивистская дедукция» [E76], а также по предисловиям к книгам Планка [E77] и Франка [E78]. Среди восточных философов Эйнштейн выделял Конфуция. Однажды в Принстоне он задремал на лекции о зен-буддизме. Возможно, в тот вечер он просто устал.

И в старости Эйнштейн продолжал считать, что философия оказывает облагораживающее влияние. В 1944 г. он писал Бенедетто Кроче: «Не думаю, что философия и разум станут в ближайшем будущем руководством к действию для среднего человека, и все же для избранных они будут оставаться превосходным прибежищем мысли» [E79].

Среди множества работ, иллюстрирующих мой тезис о том, что Эйнштейн был деятелем культуры, вкратце остановлюсь еще на двух.

Первая из них — это статья об одном из предшественников, Максвелле [E58]. По мнению Эйнштейна, Максвелл был настоящим революционером в науке. Чисто механистическая картина мира была отброшена в ходе «...великого перелома, который навсегда связан с именами Фарадея, Максвелла, Герца. Львиная доля в этой революции принадлежит Максвеллу... После Максвелла физическая реальность мыслилась в виде непрерывных... полей... Это изменение понятия реальности является наиболее глубоким и плодотворным из тех, которые испытала физика со времен Ньютона». В другом месте Эйнштейн так писал о Максвелле: «Вообразите себе охватившие его чувства, когда полученные им дифференциальные уравнения показали, что электромагнитные поля распространяются в виде поляризованных волн со скоростью света!» [E80].

Еще одно замечание — об отношении Эйнштейна к религии [E81]. «Религиозный человек искренен в том смысле, что нисколько не сомневается в значительности тех надличностных объектов и устремлений, которые не требуют и не допускают рационального обоснования». Таким образом, по Эйнштейну, «...не может быть конфликта между наукой и религией... Наука без религии увечна, религия без науки — слепа». Если следовать его собственному определению, то, конечно, Эйнштейн был очень религиозным человеком.

Деятель науки. После получения в ноябре 1915 г. уравнений гравитационного поля классическая, т. е. неквантовая, физика достигла полного совершенства, а карьера Эйнштейна — апогея. Но это не означает, что вскоре у него наступил спад. Несмотря на болезнь, в 1916—1920 гг. Эйнштейн продуктивно и плодотворно работал как над теорией относительности, так и над квантовой теорией. Постепенный спад начался после 1920 г. К концу 1924 г. произошел некоторый подъем творческой активности (вызванный появлением квантовой теории одноатомного газа), который затем резко оборвался, хотя Эйнштейн продолжал неослабно работать на протяжении следующих 30 лет.

Кто может определить, в какой степени бурное течение жизни Эйнштейна в 20-е годы было причиной (а может быть, следствием) снижения творческой активности? Многие факторы, безусловно, были ему неподвластны: возраст, болезни, множество административных обязанностей, мировая слава, страсти, бушевавшие в Веймарской республике. Я считаю, что снижение творческого накала после 1916 г. было вполне естественным. Активная общественная деятельность была для него проявлением как сильной внутренней потребности, так и бремени всемирной славы. Не знаю, так ли он был бы активен, если бы, как в прежние годы, все его внимание целиком было отдано физике. Мне кажется, что после 1916 г. у Эйнштейна, наконец, появилась возможность обратить внимание на мир, в котором он живет. В воспоминаниях Кесслера [K12] и в биографии Кайзера [R1] говорится о том, что участие в общественной жизни Берлина доставляло ему удоволь-

ствие, так же как и встречи с государственными деятелями — Ратенау, Штреземаном, Брианом, а позднее с Черчиллем и Рузвельтом. Из писем, написанных в 20-е годы (их нет в принстонском архиве), видно, что в течение нескольких лет Эйнштейн испытывал влечение к молодой женщине; в этих письмах отражены чувства, которые он, возможно, не испытал в обоих браках. Эта история закончилась в 1924 г., когда Эйнштейн написал ей, что ему придется среди звезд искать то, в чем ему отказано на Земле. Эти строки были написаны за несколько месяцев до создания квантовой механики, в те времена, когда инициативу в свои руки взяло молодое поколение физиков, а Эйнштейн продолжал идти своим путем.

Вернемся теперь к физике. Нам предстоит обсудить еще два важных направления работ Эйнштейна: единую теорию поля и квантовую теорию. Сначала мы рассмотрим его работу по единой теории поля, так как эта работа непосредственно вытекает из общей теории относительности, того научного направления, которое мы обсуждали, прежде чем начали разговор о внезапной славе доктора Эйнштейна. Затем мы обратимся к работе Эйнштейна в области квантовой теории, вновь вернемся к событиям 1905 г. и продолжим рассказ о его жизни до конца дней.

Эпиграфом к последним работам Эйнштейна могут служить строки из письма, написанного им в 1928 г. Эренфесту: «Сейчас я меньше, чем когда-либо ранее, верю в исключительно статистический характер явлений и решил посвятить остаток сил вещам, не зависящим от пышешей суеты» [E82].

Глава 17. ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

§ 17.1. Физика частиц и полей в 20-е годы

Эйнштейн умер в ночь с воскресенья на понедельник. Накануне он попросил принести ему последние выкладки по единой теории поля. Ощущение незавершенности этой работы не покидало его не только в предсмертные часы, так было всю жизнь. Задолго до смерти, еще в 1917 г., он писал Феликсу Клейну: «Если мы выбираем некий комплекс природных явлений, исходя из критерия простоты, то его теоретическое описание не останется навечно адекватным (достаточным). Например, в теории Ньютона гравитационное поле вроде бы полностью описывается потенциалом φ. Оказывается, однако, что такое описание неполно; потенциалы уступили место функциям $g_{\mu\nu}$. Но я не сомневаюсь, что настанет день, когда по неизвестным пока причинам это описание будет заменено другим. Я считаю такой процесс углубления теории безграничным» [E1].

Это было написано в 1917 г., незадолго до того, как Эйнштейн приступил к поискам пути объединения тяготения и электромагнетизма. В те времена безошибочное чутье подсказывало

ему среди комплексов природных явлений те, которые помогали ему прокладывать свой путь в науке. Уже тогда он тонко чувствовал математическую красоту, но еще не считал, что в качестве показателей новых достижений в физике следует полагаться исключительно на формальные соображения. Когда в том же 1917 г. Феликс Клейн написал Эйнштейну о конформной инвариантности уравнений Максвелла [K1], тот ответил: «Мне кажется, что Вы сильно преувеличиваете значение формального подхода. Он может быть весьма ценным, когда необходимо сформулировать в окончательном виде уже обнаруженную истину, но редко срабатывает как средство эвристического поиска» [E2].

Пожалуй, самое поразительное изменение в характере Эйнштейна в последующие годы — радикальный пересмотр отношения к формальному подходу. То, что он слишком полагался на формальную простоту, не пошло ему на пользу, но я не могу согласиться с теми, кто считает это трагедией. В научной деятельности Эйнштейна не было ничего трагического, хотя некоторые его труды будут помнить вечно, а другие заслуженно забудут. Но как бы то ни было, приступая к построению единой теории поля, Эйнштейн руководствовался исключительно физическими мотивами. Чтобы лучше понять это, нужно сначала вкратце коснуться положения дел в физике частиц и полей в 20-е годы.

Во втором десятилетии XX в. в теоретической физике был получен ряд выдающихся результатов. Резерфорд открыл атомное ядро, Бор создал квантовую теорию атома, Эйнштейн — общую теорию относительности. Но тот период может также служить прекрасной иллюстрацией того, как физиков иногда сбивает с толку неверный выбор комплекса природных явлений на основе критерия простоты. В данном случае речь идет о модели ядра, состоящего из протонов и электронов.

Первооткрывателем протона (получившего это название в 1919 г.), ядра самого легкого из атомов, стал Резерфорд. Бор первым понял, что β-распад есть процесс, в ходе которого из ядра вылетают электроны. Естественнее всего было предположить, что масса ядра почти точно равна массе входящих в его состав протонов, определяющих массовое число, а разница между массовым и зарядовым числами равна числу входящих в состав ядра электронов. Ядро следует рассматривать как «очень сложную структуру... состоящую из положительно заряженных частиц и электронов, но пока преждевременно (и вряд ли целесообразно) обсуждать возможную структуру самого ядра» [R1]. Эти слова были сказаны Резерфордом по поводу строения атома на заседании Лондонского королевского общества, проходившем 19 марта 1914 г. Но даже осторожный Резерфорд мог предложить лишь единственное объяснение природы внутриядерных сил. В том же 1914 г. он писал: «Ядро, несмотря на свой малый размер, явля-

ется само по себе очень сложной системой, состоящей из положительно и отрицательно заряженных компонентов, удерживаемых вместе значительными *электрическими* силами» [R2] (курсив мой.— *А. П.*). Резерфорд предполагал, что энергия связи ядра есть проявление электромагнетизма. «Как показал Лоренц, электрическая масса системы заряженных частиц, находящихся близко друг к другу, зависит не только от числа частиц, но и от того, как взаимодействуют их поля. При рассматриваемых размерах положительно и отрицательно заряженных электронов [под положительно заряженными электронами понимаются протоны] упаковка должна быть очень плотной, чтобы изменение массы по упомянутой выше причине было заметным. Этим может, например, объясняться тот факт, что масса атома гелия не в точности равна массе четырех атомов водорода» [R3].

Итак, первоначально считалось, что все внутриатомные силы как на периферии, так и в ядре — силы электрические. Совершенно естественное представление, в особенности если вспомнить, что ядро было открыто в результате наблюдений за рассеянием α-частиц на атомах, где основную роль играют кулоновские силы отталкивания между α-частицей и точечным ядром атома. Лишь в 1919 г. эксперименты по рассеянию дали основания подозревать, что не все может быть объяснено электрическими силами. И только в 1921 г. из экспериментов стало совершенно ясно, что закон $F \sim 1/r^2$ перестает выполняться на малых расстояниях. «Наша задача — обнаружить силовое поле, ответственное за эти эффекты... Проводимые сейчас эксперименты... демонстрируют, что... *наблюдаемые силы очень велики* (курсив мой.— *А. П.*)» [C1]. Слова, выделенные курсивом, насколько мне известно, были первым упоминанием о наличии сильных взаимодействий. Это — второе великое открытие Джеймса Чедвика. Первое открытие он сделал в 1914 г., обнаружив, что первичный β-спектр является непрерывным [C2]. Примерно до середины 20-х годов считалось, что непрерывность этого спектра связана со вторичными причинами. Существование нейтрино было постулировано лишь в 1929 г.

Ядерная физика начиналась с рассмотрения ядра без нейтронов, теория β-распада — без нейтрино. Считалось, что вещество состоит из протонов и электронов; не знали ни о слабом, ни о сильном взаимодействии. Вначале были известны лишь электромагнетизм и, конечно, тяготение.

Таким образом, мы вновь подходим к единой теории поля.

Когда Эйнштейн, Вейль и другие начали работу над созданием единой теории поля, естественно было предполагать, что задача заключается только в объединении тяготения с электромагнетизмом. Следует отметить, что независимое существование этих двух полей не приводило к каким-либо противоречиям или парадоксам. Не было ни загадок типа опыта Майкельсона — Морли, ни привлекающих внимание совпадений, таких как равенство гравита-

ционной и инертной масс. Тем не менее, с физической точки зрения было разумно и соблазнительно задать вопрос: а не имеют ли эти единственные известные в природе дальнодействующие силовые поля общего происхождения?

Случилось так, что затем развитие физики пошло по другому пути, причем Эйнштейн не только не прокладывал его, но и не шел по нему. Главенствующее положение заняли сначала квантовая механика, а затем квантовая теория поля. Пришлось вводить новые силы; были теоретически предсказаны, а потом и обнаружены новые частицы. Но несмотря на это Эйнштейн по-прежнему работал над последней задачей, которую он поставил перед собой,— над объединением гравитации и электромагнетизма. В результате обособленность Эйнштейна достигла максимальной степени.

После его смерти интерес к объединению возрос, и эта проблема стала привлекать внимание многих, но цели и методы значительно изменились. В конце этой главы я подробнее прокомментирую новый подход к программе объединения. А сейчас перейдем к рассмотрению собственного вклада Эйнштейна в проблему объединения. Время покажет, будут ли его методы иметь какую-либо ценность для теоретической физики будущего. Ясно, что его работа в данном направлении в целом не принесла интересных физических результатов. Поэтому достаточно обрисовать (опуская, насколько это возможно, детали) два основных направления, по которым двигался Эйнштейн, пытаясь достичь поставленной перед собой цели. Одно направление, при котором пространство-время распространяется до пятимерного многообразия, рассмотрено в § 17.3. О другом направлении — обобщении римановой геометрии — речь идет в § 17.5. Прежде чем перейти к рассмотрению второго направления, мы вкратце коснемся пятимановой геометрии и влияния ОТО Эйнштейна на развитие математики.

В начале 20-х годов проблема строения ядра оставалась интересной, но не первоочередной задачей, а программа объединения — вопросом, не привлекавшим особого внимания. На переднем плане пребывали квантовые явления. Когда в возрасте 40 лет Эйнштейн приступал к поискам путей объединения, он прекрасно знал об этом. Более того, он уже тогда считал, что стремление к объединению сил и к разрешению квантовых парадоксов взаимосвязаны. Позднее он был одним из немногих, кто продолжал поиски способов объединения, и одним из немногих, кто критиковал квантовую механику. Однако только он один считал, что между этими двумя областями есть связь. В этой главе об Эйнштейне и квантовой физике речь идти не будет, но в гл. 26 я расскажу о попытках Эйнштейна создать новую динамику, основанную на обобщении ОТО; в рамках такой динамики квантовая механика была бы ее естественным следствием, а не постулатом.

§ 17.2. Еще одно десятилетие размышлений

Эйнштейн закончил свою первую работу, посвященную единой теории поля, в январе 1922 г.

Много всяких событий произошло с ним после напряженных ноябрьских дней 1915 г., когда он завершал работу над ОТО. Он принял участие в применении своей теории к решению задачи сохранения энергии-импульса, к рассмотрению гравитационных волн, занимался космологией. Он ввел коэффициенты A и B в квантовой теории. Он перенес болезнь. Женился во второй раз. После ноября 1919 г. приобрел всемирную известность. Был в самом центре общественных событий в Германии. Впервые съездил в Соединенные Штаты. И все это время он постоянно думал над проблемой объединения, хотя и не публиковал никаких работ по этой теме. В 1918 г. он писал Вейлю: «В конце концов должно получиться так, что плотности действия не будут величинами аддитивными. Я тоже пытался придумать разные штуки, но каждый раз руки у меня опускались» [E3]. А вот что сообщил Эйнштейн в 1920 г. Эренфесту: «Мне не удалось добиться какого-либо прогресса в общей теории относительности. Электромагнитное поле по-прежнему стоит в ней особняком» [E4]. Из этого письма видно, что Эйнштейн не верил в теорию Вейля (о которой речь пойдет в § 17.4) и в то же время был убежден, что объединение осуществимо. Когда в 1922 г. он писал Вейлю по поводу единых теорий поля: «Я считаю, что для действительного продвижения вперед нужно вновь подсмотреть в природе некоторые общие принципы» [E5],— он по-прежнему опирался на физические соображения.

Интересы Эйнштейна того времени отнюдь не ограничивались общей теорией относительности, будь то ортодоксальная ОТО или же ее варианты, предусматривавшие объединение. Письма Эйнштейна Эренфесту, написанные в те годы, полны упоминаний интересовавших его физических идей, и в основном речь в них идет о квантовой теории. В 1921 г. он предложил новый эксперимент по проверке квантовых аспектов эффекта Доплера [E6]. В 1922 г. его сильно заинтересовал результат опыта Штерна — Герлаха [E7]. В письмах ни разу не упоминается работа по единой теории поля, написанная им совместно с Громмером в январе 1922 г. [E8], но спустя несколько недель Эйнштейн написал, что работает с Громмером над квантовыми проблемами [E9]. В 1923 г. вместе с Эренфестом он занимался квантовой теорией радиационного равновесия [E10] и с одним из друзей [1]) опубликовал результаты своей последней экспериментальной работы, посвященной определению размеров капилляров в мембранах [E11]. В конце 1924 — начале 1925 г. вышли три его статьи по газу Бозе — Эйнштейна (гл. 23).

---

[1]) О Г. Мюзаме см. гл. 28.

Однако работа над единой теорией поля не прекращалась. В ответ на теорию поля Калуцы (§ 17.3) в 1922 г. вышла работа Эйнштейна и Громмера. В § 17.5 рассказано о серии статей 1923 г., в которых рассматривается теория объединения, предложенная Эддингтоном. Но лишь после 1925 г. Эйнштейн всерьез занялся этой проблемой и самостоятельно предложил новый вариант теории объединения.

С того времени изменился характер научных работ Эйнштейна. В 1926 г. он еще опубликовал три статьи, написанные в том легком, но отнюдь не легкомысленном стиле, который был характерен для него раньше: одну о причинах образования извилин в руслах рек [E12] и две о свойствах света, испускаемого каналовыми лучами [E13, E14]. Но это были последние работы такого рода.

Эйнштейн вступил в завершающий период жизни — ему уже под пятьдесят. Время от времени он еще публиковал работы по традиционной ОТО, в частности по проблеме движения, но основные усилия он направил на создание единой теории поля, а также на поиски такого варианта квантовой механики, который лишал бы ее статуса фундаментальной теории. Ранее уже упоминалось о том, что по мнению Эйнштейна эти две проблемы тесно связаны между собой; более подробно речь о них пойдет в § 26.5.

И первая статья Гейзенберга по матричной механике [H1], и первая самостоятельная статья Эйнштейна, посвященная единой теории поля [E15], были закончены в июле 1925 г.; первая статья Шрёдингера по волновой механике [S1] была представлена в январе 1926 г. Как и в случае специальной и общей теорий относительности, Эйнштейн около десяти лет посвятил размышлениям, прежде чем окончательно занялся построением единой теории поля. Однако на этот раз не он, а другие предложили в конце концов новые физические идеи. Прошло десять лет, затем еще десять и еще, но положение не изменилось — он все писал и писал без успеха до самой смерти. Возможно, все его усилия были напрасны, но он считал себя обязанным делать то, что казалось ему наиболее важным, и никогда не боялся поступать именно так. Такова была его судьба.

Рассмотрим теперь, что он сделал в области пятимерных теорий.

§ 17.3. Пятое измерение

Калуца и Оскар Клейн. Первопроходцы единой теории поля были математиками. Первая попытка объединения, основанная на обобщении римановой геометрии в обычных четырех пространственно-временных измерениях, была предпринята в 1918 г. Германом Вейлем (§ 17.4). Стремясь к той же цели и опираясь на работу Вейля, математик и превосходный лингвист Теодор Калуца первым предположил, что объединения, возможно, удастся добиться, распространив понятие пространства-времени на пяти-

мерное многообразие [2]). Его работа на эту тему была опубликована в 1921 г. [К2], но саму идею он высказывал еще в 1919 г., как можно видеть из письма, написанного ему Эйнштейном в апреле этого года: «Идея создания [единой теории поля] с использованием пятимерного цилиндрического мира никогда не приходила мне в голову... На первый взгляд, эта идея нравится мне чрезвычайно» [Е16]. Оставаясь по-прежнему на позициях Маха, Эйнштейн добавил, что нужно посмотреть, позволяет ли новая теория получить разумное решение космологической проблемы [3]). Через несколько недель он вновь написал Калуце: «Формальная целостность Вашей теории просто поражает» [Е18]. В 1921 г. он направил работу Калуцы в Прусскую академию наук для публикации. (Я не знаю, чем была вызвана такая задержка в публикации.)

В хорошо написанной работе Калуцы содержатся почти все основные направления пятимерного подхода:

1. Вводится инвариантный элемент длины

$$ds^2 = \gamma_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \qquad \mu, \nu = 1, \ldots, 5, \tag{17.1}$$

где метрический тензор $\gamma_{\mu\nu}$ удовлетворяет двум ограничениям. Во-первых, он должен зависеть только от пространственно-временных координат x^i $(i = 1, \ldots, 4)$:

$$\partial \gamma_{\mu\nu} / \partial x^5 = 0. \tag{17.2}$$

Во-вторых, предполагается, что γ_{55} — положительный числовой инвариант, который может быть нормирован к виду

$$\gamma_{55} = 1. \tag{17.3}$$

Таким образом, рассматривается цилиндрический мир с пятым пространственноподобным измерением, причем пятая ось является выделенной. Уравнение (17.3) позднее стали называть условием цилиндричности.

2. Здесь γ_{i5} — 4-векторное поле, связанное с римановым пространственно-временным подмногообразием R_4,— предполагается пропорциональным электромагнитному потенциалу.

3. Уравнения поля имеют вид

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = -\varkappa T_{\mu\nu}, \tag{17.4}$$

где $R_{\mu\nu}$ и R — знакомые функции от $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ и их первых производных, а $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса, не содержащий чисто электромагнитного вклада. Калуца рассматривал единственный случай, когда источником является одиночная точечная частица массой m и зарядом e, $T^{\mu\nu} = m u^\mu u^\nu$, $u^\mu = dx^\mu/ds$, и показал, что при

---

[2]) Еще в 1914 г. Нордстрём предложил использовать пятимерное пространство для объединения электромагнетизма и скалярного гравитационного поля [N1].

[3]) Как упоминалось в § 15.5, Эйнштейн использовал в 1919 г. космологический член для того, чтобы связать электромагнетизм с тяготением [Е17].

$\mu, \nu = i, j$ получаются уравнения гравитационного поля; при $\mu, \nu = i, 5$ — уравнения Максвелла, а условие $\mu, \nu = 5, 5$ приводит к тривиальному тождеству. Для получения уравнений Максвелла необходимо положить u^5 пропорциональным e/m. Таким образом, mu^μ есть 5-вектор «импульса-энергии-заряда».

4. Геодезическая цилиндрического мира может быть отождествлена с траекторией пробной заряженной частицы, движущейся в комбинированном гравитационно-электромагнитном поле.

Калуца получил свои результаты только для случая слабых полей ($g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h_{\mu\nu}| \ll 1$, $\eta_{55} = 1$) и малых скоростей ($v/c \ll 1$). Значительного успеха удалось добиться Оскару Клейну, показавшему в 1926 г.[4]), что указанные два ограничения излишни [K3]. Унификация (по крайней мере этот ее вариант) никак не связана со слабыми полями и малыми скоростями. Эта теория в ее окончательном виде стала известна как теория Калуцы — Клейна. Вкратце ее суть сводится к следующему:

1. Начнем с квадратичной формы уравнения (17.1) и потребуем, чтобы она была инвариантна относительно группы преобразований G_5, т. е. относительно комбинации знакомой группы точечных преобразований G_4 в R_4 и группы S_1, определяемой выражением

$$x_5' = x_5 + f(x^i). \tag{17.5}$$

Соотношения (17.2) и (17.3) инвариантны относительно G_5.

2. Определим g_{ik} следующим образом:

$$g_{ik} = \gamma_{ik} - \gamma_{i5}\gamma_{k5}. \tag{17.6}$$

Величины g_{ik} симметричны; они являются тензорами относительно G_4 и инвариантны относительно S_1. Таким образом, $g_{ik}dx^i dx^k$ можно определить как стандартный элемент длины в R_4.

3. Определим электромагнитные потенциалы φ_i так:

$$\varphi_i = \sqrt{2\varkappa}\,\gamma_{i5}. \tag{17.6a}$$

Они представляют собой 4-векторы относительно G_4 и, поскольку уравнение (17.1) инвариантно относительно G_5, преобразуются в S_1 следующим образом:

$$\varphi_i' = \varphi_i - \sqrt{2\varkappa}\,\partial f/\partial x^i, \tag{17.7}$$

откуда видно, что S_1 — геометризованный вариант локальной электромагнитной калибровочной группы.

4. Пусть $R^{(5)}$ есть скаляр кривизны в пятимерном пространстве. Непосредственный подсчет позволяет получить выражения

$$R^{(5)} = R^{(4)} + (\gamma_{55}/4)F^{ik}F_{ik}, \tag{17.8}$$

$$F_{ik} = \partial\varphi_i/\partial x^k - \partial\varphi_k/\partial x^i, \tag{17.9}$$

где $R^{(4)}$ — скаляр кривизны в R_4. Итак, $R^{(5)}$ является объединен-

[4]) В том же году пятимерный подход к унификации был независимо предложен Мандельом [M1]; см. также [M2, F1].

ным лагранжианом тяготения и электромагнетизма! Из (17.8) сразу видно, почему в уравнение (17.6а) был введен множитель $\sqrt{2\varkappa}$ и почему так важно, чтобы величина γ_{55} была положительной (и нормированной к $+1$).

5. Еще в 1926 г. Клейн предположил, что пятое измерение может быть как-то связано с квантованием [K4], и эту идею он развивал в течение многих лет [K5]. В частности, он показал, что из лагранжиана L для частицы массой m:

$$L = (1/2)\, m (ds/d\tau)^2, \tag{17.10}$$

где ds задается уравнением (17.1), а $d\tau$ — дифференциал собственного времени, следует выражение для пяти сопряженных импульсов p_μ:

$$p_\mu = \partial L / \partial (dx^\mu/d\tau), \tag{17.11}$$

при котором p_5 — константа вдоль геодезической. При $i = 1, \ldots, 4$ из соответствующих уравнений движения следуют полученные Калуцей выражения для движения по геодезической в гравитационном и электромагнитном полях (см., например, обзорную статью Паули [P1]) при условии, что

$$p_5 = Ne/c\sqrt{2\varkappa}, \tag{17.12}$$

где Ne — заряд рассматриваемой частицы, e — заряд электрона. Далее Клейн предположил [K4], что так как N принимает только целочисленные значения, «[уравнение (17.12)] позволяет толковать атомистичность электричества как закон квантовой теории. В действительности, если предположить, что пятимерное пространство замкнуто в направлении оси x^5 с периодом l, и применить к нашим геодезическим правила квантовой механики, то можно ожидать, что величина p_5 описывается выражением

$$p_5 = Nh/l». \tag{17.13}$$

Таким образом, в теорию вводится длина l, задаваемая выражением (l — в сантиметрах)

$$l = hc\sqrt{2\varkappa}/e = 0{,}8 \cdot 10^{-30}. \tag{17.14}$$

Клейн предположил, что «...ненаблюдаемость пятого измерения в обычных экспериментах может объясняться малостью [величины l] при усреднении по пятому измерению»[5]). Эйнштейн, развивая в конце 30-х годов теорию Калуцы — Клейна, также в те-

---

[5]) Сразу же после создания квантовой механики в течение нескольких лет высказывались и другие предположения, имевшие целью увязать пятое измерение с новой механикой. Например, предлагалось считать γ_{55} скалярным полем (а не константой), тогда оно могло быть как-то связано с полем волны Шрёдингера [G1].

Джордж Уленбек рассказывал мне: «Я помню, что когда летом 1926 г. Оскар Клейн излагал нам свои идеи, которые должны были позволить не только объединить уравнения Максвелла и Эйнштейна, но и включить в рассмотрение квантовую теорию, я пришел в экстаз! Наконец-то станет понятно, как устроен мир!».

чение ряда лет полагал, что пятое измерение имеет реальный смысл. Но следует отметить, что он заинтересовался идеями Калуцы еще до выхода в свет работ Клейна 1926 г.

Эйнштейн и теория Калуцы — Клейна. В 1922 г. Эйнштейн и Громмер задались вопросом: имеет ли уравнение (17.4) решения, допускающие наличие каких-либо частиц, в отсутствие «источников», т. е. при $T_{\mu\nu} = 0$? Над этим же вопросом Эйнштейн размышлял и раньше в рамках традиционной ОТО. Тогда он полагал, что неизвестно, как можно задать T_{ik} ($i, k = 1, \ldots, 4$) с той же определенностью, которая присуща левой части уравнений гравитационного поля. А можно ли вообще обойтись без T_{ik}? Вероятно, да, отвечает Эйнштейн, поскольку уравнения, описывающие только гравитационное поле без вещества, нелинейны. Следовательно, нужно определить, имеются ли несингулярные решения, соответствующие наличию частицеподобных объектов, при $T_{ik} = 0$. Из дальнейшего изложения будет видно, что Эйнштейн настоятельно требовал, чтобы в приемлемой теории существовало свободное от сингулярностей решение уравнений поля без источников.

Применительно к теории Калуцы вопрос о том, что будет при отсутствии T_{ik}, сводится к приравниванию нулю $T_{\mu\nu}$. Эйнштейн и Громмер [E8] показали, что «...в теории Калуцы нет центрально-симметричного решения, зависящего только от $g_{\mu\nu}$, которое можно было бы отождествлять с (несингулярным) электроном»; этот вывод не имеет ничего общего с единой теорией поля как таковой, поскольку его можно было сделать и в рамках традиционной ОТО. В дальнейшем Эйнштейн опубликовал еще два кратких сообщения, посвященных пятимерной теории; они вышли в феврале 1927 г. [E19, E20]. Публикация этих работ остается для меня загадкой, и я объясню почему. Напомню, что в 1926 г. (в апреле, если быть точным) Клейн предложил улучшенный вариант теории Калуцы. В августе 1926 г. Эйнштейн написал Эренфесту о том, что Громмер обратил его внимание на работу Клейна: «Тема ее — Калуца, Шрёдингер, общая теория относительности» [E21]. Через десять дней Эйнштейн сообщил Эренфесту: «Статья Клейна очень изящна и убедительна, но принцип Калуцы мне кажется неестественным» [E22]. Затем вышли в свет два упомянутых выше сообщения Эйнштейна, после чего он написал Лоренцу: «Похоже, что объединения гравитации с теорией Максвелла удалось добиться полностью удовлетворительным образом в рамках пятимерной теории (Калуцы — Клейна — Фока)» [E23, F1].

В общем нет ничего удивительного в том, что Эйнштейн изменил свое мнение, и теория, которая раньше казалась ему неестественной, через несколько месяцев полностью его удовлетворяла. Для меня загадкой является примечание ко второму сообщению: «Г. Мандель сообщил мне, что изложенные здесь результаты не новы и содержатся в работах Клейна». Тут же приведена и ссылка на статью Клейна 1926 г. [K3]. Я совершен-

но не понимаю, зачем Эйнштейну вообще понадобилось печатать эти два сообщения.

После этого Эйнштейн ничего не публиковал по проблеме пяти измерений до 1931 г., когда он с Вальтером Майером предложил новую теорию, «...психологически связанную с известной теорией Калуцы; однако она избегает дополнения физического континуума до континуума пяти измерений» [E24]. Он с энтузиазмом писал Эренфесту: «...по моему мнению, [эта теория] окончательно разрешает проблемы макроскопической области» [E25] (последние два слова нужно понимать так: исключая квантовые явления). При этом Эйнштейн исходил из следующих соображений: «...вряд ли разумно заменять четырехмерный континуум на пятимерный и затем искусственно налагать ограничение на одно из этих пяти измерений с тем, чтобы объяснить, почему оно не проявляет себя физически. Нам удалось сформулировать теорию, которая формально близка к теории Калуцы, но свободна от упомянутого возражения. Это достигается путем введения совершенно нового математического понятия...» [E26].

Новый математический подход, предложенный Эйнштейном и Майером в двух статьях [E24, E27], заключается в том, что риманово многообразие R_4 не погружается в пятимерное пространство. Вместо этого каждой точке R_4 ставится в соответствие пятимерное векторное пространство M_5, а локальное пространство Минковского (назовем его M_4) погружается в локальное пространство M_5, имеющее метрику $4+1$. Введены правила разложения тензоров в M_5 относительно M_4. Определена операция переноса 5-тензоров из одного пространства M_5 в другое пространство M_5, связанное с соседней точкой в R_4. При этом рассмотрена пятимерная связность, некоторые компоненты которой (при помощи специального приема) идентифицируются с римановой связностью в R_4, и, кроме того, получается только антисимметричный тензор F_{kl}, отождествляемый с электромагнитным полем[6]). Однако, как отмечал Эйнштейн в письме Паули [E28], приходится предполагать, что F_{kl} — ротор 4-вектора; кроме того, уравнения Эйнштейна — Майера не могут быть выведены из вариационного принципа. После 1932 г. в работах Эйнштейна такой подход больше ни разу не упоминался.

Последнюю попытку построения пятимерной теории Эйнштейн предпринял уже на новом месте — в Америке. К тому времени (происходило это в 1938 г.) его старого друга Эренфеста уже не было в живых. В этот раз он решил сделать координату x^5 не менее, а более реальной, чем в теории Калуцы — Клейна. Сначала он работал с Питером Бергманом; позднее к ним присоединился Валентин Баргман. Года три они довольно активно развивали это направление. В учебнике Бергмана говорится, из чего они при этом исходили: «Нам представлялось невозмож-

[6]) Эти правила воспроизводятся в сжатом виде в статьях Паули и Соломона [P2], перепечатанных в избранных трудах Паули [P3].

ным вместить в рамки „жесткой" четырехмерной теории результаты, полученные в квантовой теории, в частности соотношение неопределенностей Гейзенберга. Поскольку описание пятимерного мира при помощи четырехмерного формализма было бы неполным, мы надеялись, что неопределенность „четырехмерных закопов" позволит учесть соотношение неопределенностей и что в конечном итоге удастся объяснить квантовые явления при помощи [классической] теории поля» [B1].

Такой подход соответствовал идеям Клейна [K4] о том, что пятимерное пространство замкнуто в направлении пятого измерения с фиксированным периодом. Вновь рассматривалась группа G_5 [см. (17.5)]; сохранялись также выражение для линейного элемента [уравнение (17.1)], условие, накладываемое на γ_{55} [уравнение (17.3)], и определение g_{ik} [уравнение (17.6)], но обобщалось уравнение (17.2). По-прежнему предполагалось, что γ_{i5} (электромагнитные потенциалы) зависят только от x^i, но (и в этом состояло новшество) считалось, что величины g_{ik} могут периодически зависеть от x^5. Подробно математический аппарат этой теории рассмотрен в книге Бергмана [B1] (см. также [B2,P1]). Изложены два варианта теории. В первом из них [E29] уравнения поля выводятся из вариационного принципа. Из-за вновь введенной зависимости от x^5 получаются интегро-дифференциальные уравнения (остается интегрирование по x^5). В эти уравнения входит также ряд произвольных констант, так как действие может содержать новые инварианты (зависящие от производных g_{ik} по x^5). Во втором варианте [E30] авторы отказываются от вариационного принципа, а для наложения ограничений на указанные константы в виде постулатов вводят тождества Бьянки.

В теориях такого типа выражения для величин g_{ik} можно записать в виде (период нормирован к 2π)

$$\left.\begin{aligned} g_{ik}(x^5, x^i) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_{ik}^{(n)}(x^i)\,\exp(inx^5), \\ g_{ik}^{(-n)} &= g_{ik}^{(n)*}. \end{aligned}\right\} \qquad (17.15)$$

Баргман и Бергман рассказывали мне, что Эйнштейн надеялся как-то увязать высшие фурье-компоненты с квантовыми полями. Когда эти надежды не оправдались, он навсегда отказался от пятимерного подхода.

Дополнения. Предпринимались и предпринимаются другие попытки использования многообразий пяти и более измерений для описания физического мира.

А. Вскоре после публикации теории Эйнштейна — Майера была предложена другая пятимерная теория, получившая наименование проективной теории относительности. В ее разработке приняли участие многие ученые [7]). В этой теории предполагает-

[7]) Конкретные ссылки см. в [S2]. Наилучшим введением в данную проблему являются две статьи Паули [P4].

ся, что пространственно-временные координаты x^i представляют собой однородные функции нулевого порядка от пяти координат X^μ. В проективном пятимерном пространстве (с сигнатурой $4+1$) вводится риманова метрика с инвариантным линейным элементом $ds^2 = g_{\mu\nu}dX^\mu dX^\nu$. Вместо условия цилиндричности используется следующее условие:

$$g_{\mu\nu}X^\mu X^\nu = 1. \tag{17.16}$$

Величины $\gamma_\nu^k = \partial x^k/\partial X^\nu$ проектируются из пятимерного в четырехмерное пространство [8]). Можно доказать, что

$$X_\mu = (\sqrt{2\varkappa}/c)\,\gamma_\mu^k \varphi_k + (1/F)\,\partial F/\partial X^\mu, \tag{17.17}$$

где φ_k — электромагнитные потенциалы, F — произвольная однородная функция первого порядка от X^μ. Таким образом, сами проективные координаты непосредственно связываются с потенциалами с точностью до пятикалибровочного преобразования.

Уравнение Дирака в проективном пространстве рассмотрено Паули [P4]. Вариационные методы были применены к этой теории Пайсом [P5]; получены следующие результаты. Пусть

$$\delta \int (R - \varkappa \mathscr{L})\,\sqrt{g}\,d^5X = 0 \tag{17.18}$$

— выражение для вариационного принципа, где R — скаляр 5-кривизны. Для $\mathscr{L}$ задано только то, что это скалярная функция переменных поля и их ковариантных производных. Кроме того, необходимо допустить в явном виде зависимость $\mathscr{L}$ от координат X^μ. Распространяя методы Нётер на этот более общий случай, можно в явном виде получить выражение для тензора источника $T^{\mu\nu}$, в которое входят $\mathscr{L}$ и производные от $\mathscr{L}$, взятые по переменным поля и по X^μ. Этот тензор удовлетворяет пяти законам сохранения

$$T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0, \tag{17.19}$$

которые, как показано, являются дифференциальными законами сохранения энергии, импульса и заряда.

Б. Ряд авторов, в частности Иордан [J1], рассматривали распространение такого формализма на случай, когда правая часть уравнения (17.16) заменяется скалярным полем. Бергман сообщил мне, что они с Эйнштейном также работали над таким обобщением [B3].

В. В 80-е годы специалисты по физике частиц начали рассматривать уравнения поля в $(4+N)$-мерных многообразиях, где 4 относится к пространству-времени, а дополнительные N переменные соответствуют компактной пространственноподобной N-мерной области, которая предполагается настолько малой, чтобы не допустить противоречий с законами физики. Рассматривают-

[8]) Математическая взаимосвязь данной теории с теорией Калуцы — Клейна обсуждается в работе [B1].

ся различные значения N, так чтобы учесть неабелевы калибровочные поля. Некоторые авторы предлагают отказаться от ограничений типа уравнений (17.2) и (17.3) в надежде на то, что компактность дополнительных измерений явится результатом «спонтанной компактификации» типа спонтанного нарушения симметрии. Будущее покажет, к чему приведут эти усилия. В заключение представляется уместным отметить, что в 1981 г. была опубликована статья под заголовком «В поисках реалистической теории Калуцы — Клейна» [W1][9]).

Два варианта. Эйнштейн потратил много усилий на разработку теорий объединения второго типа, в которых сохраняется четырехмерное многообразие, но используется более общая геометрия, чем риманова; этим попыткам он уделял гораздо больше внимания, чем пятимерным теориям.

Сейчас я предлагаю читателю на выбор два варианта.

Вариант 1. Поверьте мне на слово, что эти попытки пока ни к чему не привели, пропустите следующий параграф, бегло просмотрите еще два и переходите к квантовой теории.

Вариант 2. Если вам интересно узнать, чем занимались в данной области не только Эйнштейн, но и такие ученые, как Эддингтон и Шрёдингер, переходите к § 17.4.

§ 17.4. Теория относительности и постриманова дифференциальная геометрия

В 1979 г. в Принстоне проходил симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения Эйнштейна. В своей лекции [C3] об общей теории относительности и дифференциальной геометрии знаменитый математик Шинг-Шен Черн сказал: «Испытываешь очень странное чувство, выступая на тему, с которой не знаком и наполовину»,— и добавил: «...очень скоро я понял, как безумно сложна задача, поставленная Эйнштейном, и как велика разница между математикой и физикой». Обе эти фразы можно с полным правом отнести к данному параграфу. В остальном этот параграф и выступление Черна мало связаны друг с другом. Черн в основном рассматривал глобальные проблемы современной дифференциальной геометрии, такие, как теория нитевидных волокон; Эйнштейн не только никогда не писал на эту тему, но и не упоминал таких проблем в беседах со мной. Моя цель — рассказать здесь о том, как обстояло дело с единой теорией поля во времена Эйнштейна, когда обсуждалась исключительно локальная дифференциальная геометрия и в качестве основного аппарата использовалось несколько теперь устаревшее (и в целом неудовлетворительное) исчисление Риччи. Таким образом, цель этого параграфа состоит в том, чтобы кратко изложить ос-

---

[9]) В этой работе приведены ссылки на другие последние результаты, полученные в данной области.

новные принципы исчисления Риччи [10]). Проще всего сначала рассмотреть ряд стандартных уравнений и результатов, следующих из римановой геометрии, которые приводятся в любом хорошем учебнике по ОТО, и затем обобщить их.

В римановой геометрии имеются линейный элемент

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \tag{17.20}$$

инвариантный относительно всех непрерывных точечных преобразований $x^i \to x^{i'} = x^{i'}(x^j)$, а также связность $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$, соотносящаяся с $g_{\mu\nu}$ следующим образом:

$$\Gamma^\lambda_{\mu\nu} = (1/2)\, g^{\lambda\sigma} (\partial g_{\sigma\mu}/\partial x^\nu + \partial g_{\sigma\nu}/\partial x^\mu - \partial g_{\mu\nu}/\partial x^\sigma). \tag{17.21}$$

При дальнейшем изложении я буду проводить различие между двумя группами свойств.

Первая группа:

1. Ковариантное векторное поле A_μ и контравариантное векторное поле B^μ преобразуются так:

$$A'^\mu = (\partial x'^\mu/\partial x^\nu) A^\nu, \quad B'_\mu = (\partial x^\nu/\partial x'^\mu) B_\nu, \tag{17.22}$$

откуда по обычным правилам выводятся законы преобразования тензоров высокого ранга.

2. Свертка тензора ранга n $(n \geqslant 2)$ приводит к тензору ранга $n-2$.

3. Ковариантная производная от A_μ, определяемая выражением

$$A_{\mu;\nu} = \partial A_\mu/\partial x^\nu - \Gamma^\lambda_{\mu\nu} A_\lambda, \tag{17.23}$$

есть тензор второго ранга. Ковариантные производные ковариантных тензоров более высокого ранга берутся обычным образом. В частности, $Q_{\mu\nu\lambda}$, задаваемый выражением

$$Q_{\mu\nu\lambda} = g_{\mu\nu;\lambda}, \tag{17.24}$$

есть тензор третьего ранга.

4. Связность преобразуется так:

$$\Gamma'^{\lambda}_{\mu\nu} = \frac{\partial x'^\lambda}{\partial x^\alpha} \frac{\partial x^\beta}{\partial x'^\mu} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\nu} \Gamma^\alpha_{\beta\nu} + \frac{\partial x'^\lambda}{\partial x^\alpha} \frac{\partial^2 x^\alpha}{\partial x'^\mu \partial x'^\nu}. \tag{17.25}$$

5. Тензор кривизны определяется следующим образом:

$$R^\lambda_{\mu\nu\rho} = \partial\Gamma^\lambda_{\mu\nu}/\partial x^\rho - \partial\Gamma^\lambda_{\mu\rho}/\partial x^\nu + \Gamma^\alpha_{\mu\nu}\Gamma^\lambda_{\alpha\rho} - \Gamma^\alpha_{\mu\rho}\Gamma^\lambda_{\alpha\nu}. \tag{17.26}$$

Этот тензор играет центральную роль во всех обсуждающихся далее единых теориях поля.

6. Тензор Риччи $R_{\mu\nu}$ определяется как

$$R_{\mu\nu} = R^\lambda_{\mu\lambda\nu} = \partial\Gamma^\lambda_{\mu\nu}/\partial x^\lambda - \partial\Gamma^\lambda_{\mu\lambda}/\partial x^\nu + \Gamma^\alpha_{\mu\lambda}\Gamma^\lambda_{\alpha\nu} - \Gamma^\alpha_{\mu\nu}\Gamma^\lambda_{\alpha\lambda}. \tag{17.27}$$

---

[10]) Более подробно об этом можно прочитать в прекрасной небольшой книжке Шрёдингера [S3].

Вторая группа:

1. $$\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} = \Gamma^{\lambda}_{\nu\mu}. \tag{17.28}$$

2. $$\Gamma^{\alpha}_{\alpha\lambda} = (1/\sqrt{g})\,\partial\sqrt{g}/\partial x^{\lambda}, \quad g \equiv -\det g_{\mu\nu}. \tag{17.29}$$

3. $$R_{\mu\nu} = R_{\nu\mu}. \tag{17.30}$$

4. $$Q_{\mu\nu\rho} = 0. \tag{17.31}$$

5. Если A^{ν} — контравариантное векторное поле с ковариантной производной, определяемой выражением

$$A^{\mu}_{;\nu} = \partial A^{\mu}/\partial x^{\nu} + \tilde{\Gamma}^{\mu}_{\alpha\nu}A^{\alpha}, \tag{17.32}$$

то

$$\tilde{\Gamma}^{\mu}_{\alpha\nu} = \Gamma^{\mu}_{\alpha\nu}. \tag{17.33}$$

6. Величина R, определяемая выражением

$$R = g_{\mu\nu}R^{\mu\nu}, \tag{17.34}$$

есть скаляр.

7. $$[R^{\mu\nu} - (1/2)g^{\mu\nu}R]_{;\nu} = 0. \tag{17.35}$$

8. Уравнения

$$R'_{\mu\nu,\lambda} = 0 \tag{17.36}$$

представляют собой необходимые и достаточные условия искривленности (псевдоевклидовости) риманова пространства.

Перейдем теперь к обобщениям. Забудем об уравнениях (17.20) и (17.21) и о второй группе свойств; сохраним лишь первую. Мы получим, таким образом, не просто новую геометрию, а новый класс геометрий или, как еще говорят, новый класс связностей. Отметим некоторые их общие характеристики.

А. Метрики больше нет; есть только связности. Уравнение (17.25), которое теперь не выводится из свойств преобразований $g_{\mu\nu}$, а определяется, достаточно для того, чтобы установить, что $A_{\mu;\nu}$ и $R_{\mu\nu}$ — тензоры. Таким образом, мы по-прежнему имеем дело с тензорным исчислением.

Б. Общая связность определяется 128 величинами $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}$ и $\tilde{\Gamma}^{\lambda}_{\mu\nu}$. Если они заданы в одной системе, то они заданы во всех системах при условии дополнительного введения правила, согласно которому $\tilde{\Gamma}^{\lambda}_{\mu\nu}$ по-прежнему преобразуется в соответствии с уравнением (17.25), даже если $\Gamma'^{\lambda}_{\mu\nu} \neq \tilde{\Gamma}^{\lambda}_{\mu\nu}$.

В. В первой группе мы сохранили в уравнении (17.24) упоминание о $g_{\mu\nu}$. Это было сделано потому, что в такого рода обобщениях часто вводится фундаментальный тензор $g_{\mu\nu}$, но уже не через инвариантный элемент длины. Следовательно, этот тензор не может больше называться метрическим тензором. Фундаментальный тензор, тем не менее, необходим для того, чтобы связать при помощи правила $A_{\mu} = g_{\mu\nu}A^{\nu}$ любой контравариант-

ный вектор A^μ с ковариантным вектором A_μ; это же правило справедливо и для тензоров более высокого ранга. Тензор $g_{\mu\nu}$ не обязательно удовлетворяет уравнению (17.31) и не обязательно должен быть симметричным (если он несимметричен, то, естественно, $g_{\mu\nu}A^\nu \neq g_{\nu\mu}A^\nu$).

Г. Поскольку уравнение (17.28) не обязательно справедливо, важно учитывать и сохранять порядок индексов μ, ν в уравнении (17.23). Для несимметричных $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ замена $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ в уравнении (17.23) связностью $\Gamma^\lambda_{\nu\mu}$ также определяет связность, но уже другую.

Д. Даже если связность $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ симметрична по индексам μ и ν, отсюда не следует, что тензор $R_{\mu\nu}$ симметричен: можно пользоваться уравнением (17.27), но не (17.30). Это важно учитывать при обсуждении теорий Вейля и Эддингтона, о которых речь пойдет ниже.

Е. Для любой симметричной связности справедливы тождества Бьянки:

$$R^\lambda_{\mu\nu\rho;\sigma} + R^\lambda_{\mu\sigma\nu;\rho} + R^\lambda_{\mu\rho\sigma;\nu} = 0. \qquad (17.37)$$

Ж. Величина $R^\lambda_{\mu\nu\sigma}$ по-прежнему представляет собой тензор, но из выражения $R^\lambda_{\mu\nu\sigma} = 0$ в общем случае не обязательно следует неискривленность пространства (см. теорию «далекого» параллелизма, о которой идет речь в следующем параграфе).

И. Всегда можно привести тензор кривизны к тензору Риччи сверткой, но в отсутствие фундаментального тензора нельзя получить из тензора Риччи скаляра кривизны.

К. Свернутые тождества Бьянки [уравнения (17.35)] в общем случае не только не справедливы, но даже не определены. Из последних двух утверждений физику становится ясно, что использовать общие связности — значит напрашиваться на неприятности.

Теория связностей начала развиваться с 1916 г., после выхода в свет работы математика Герхарда Гессенберга [H2]. Появление этой теории было следствием создания ОТО. Об этом можно судить хотя бы по тому, что на ОТО постоянно ссылаются все, кто развивал теорию связностей в последующие годы, например Вейль, Леви-Чивита, Схоутен, Стройк и, в особенности, Эли Картан, который в 1922 г. ввел понятие кручения [C4]; его статья «Многообразия с аффинной связностью и общая теория относительности» [C5] легла в основу современной теории нитевидных волокон [C3]. Таким образом, труды Эйнштейна оказали глубокое влияние на математику.

В первой книге по теории связностей «Исчисление Риччи» Схоутена [S4], опубликованной в 1924 г., перечисляется большое число связностей [S4, с. 75], определяемых по относительным свойствам $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ и $\tilde{\Gamma}^\lambda_{\mu\nu}$, свойствам симметрии $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ и свойствам $Q_{\mu\nu\rho}$. К большому облегчению читателя могу сообщить, что во всех

рассматриваемых ниже единых теориях поля уравнение (17.33)] выполняется. Это приводит к значительным упрощениям, поскольку тогда и только тогда будут справедливы соотношения типа

$$(A^\lambda B_\lambda)_{;\mu} = A^\lambda_{;\mu} B_\lambda + A^\lambda B_{\lambda;\mu}. \tag{17.38}$$

Очень важно, что порядок индексов в (17.23) и (17.32) подбирается так, чтобы уравнение (17.38) было справедливо и для несимметричных связностей.

Рассмотрим в качестве примера использования такого аппарата теорию Вейля 1918 г. [W2]. В основе этой теории лежат уравнение (17.33), симметричная (иначе говоря, аффинная) связность и симметричный фундаментальный тензор $g_{\mu\nu}$. Здесь, однако, $Q_{\mu\nu\rho} \neq 0$. Вместо этого имеем выражение

$$(\partial/\partial x^\rho + \varphi_\rho)\, g_{\mu\nu} - g_{\mu\sigma}\Gamma^\sigma_{\nu\rho} - g_{\nu\sigma}\Gamma^\sigma_{\mu\rho} = 0, \tag{17.39}$$

которое сводится к $Q_{\mu\nu\rho} = 0$ при $\varphi_\rho = 0$. Величина φ_ρ есть 4-вектор. Данное уравнение инвариантно относительно выражений

$$g'_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}, \tag{17.40}$$

$$\varphi'_\mu = \varphi_\mu - (1/\lambda)\, \partial\lambda/\partial x^\mu, \tag{17.41}$$

$$\Gamma'^\sigma_{\mu\nu} = \Gamma^\sigma_{\mu\nu}, \tag{17.42}$$

где λ — произвольная функция от x^μ. Уравнения (17.40) — (17.42) совместны, поскольку из (17.39) следует, что

$$\Gamma^\lambda_{\mu\nu} = \Gamma^{*\lambda}_{\mu\nu} + (1/2)\, g^{\lambda\sigma}(g_{\sigma\mu}\varphi_\nu + g_{\sigma\nu}\varphi_\mu - g_{\mu\nu}\varphi_\sigma), \tag{17.43}$$

где $\Gamma^{*\lambda}_{\mu\nu}$ — выражение Римана, задаваемое правой частью уравнения (17.21). Группа Вейля представляет собой результат группы точечных преобразований и группы λ-преобразований, определяемых уравнениями (17.40) и (17.41). Величины x^λ остаются неизменными после применения λ-преобразований, в результате чего $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu \to \lambda ds^2$. Если предположить, что величина ds есть некая длина, то эта длина подвергается перекалибровке, откуда и произошло выражение *калибровочное преобразование*, вошедшее в физику из жаргона железнодорожников [11]). Величины $R^\lambda_{\mu\nu\sigma}$ и $F_{\mu\nu}$, определяемые выражением

$$F_{\mu\nu} = \partial\varphi_\mu/\partial x^\nu - \partial\varphi_\nu/\partial x^\mu, \tag{17.44}$$

представляют собой калибровочно-инвариантные тензоры. Калибровочно-инвариантным является поэтому и тензор $R_{\mu\nu}$ (являющийся теперь несимметричным); R есть скаляр, но не калибровочно-инвариантный: $R' = \lambda^{-1}R$, так как $g^{\mu\nu'} = \lambda^{-1}g^{\mu\nu}$.

---

[11]) В английском языке слово «gauge» означает и калибровку, и ширину железнодорожной колеи. Первоначально слово «regauge» употреблялось в значении «переходить с узкой колеи на широкую» и наоборот.— *Примеч. пер.*

Ясно, к чему клонил Вейль: $F_{\mu\nu}$ должно быть электромагнитным полем. Кроме того, он смог показать, что из его группы автоматически следуют пять законов сохранения энергии, импульса и заряда. Если потребовать единственность фундаментального лагранжиана L, обеспечивающего справедливость уравнений гравитационного и электромагнитного полей, то данная теория перестает быть единой, поскольку к любому L можно добавить калибровочно-инвариантный скаляр $\int F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}\sqrt{g}\,d^4x$, умноженный на произвольную величину. Подробное обсуждение и критика этой теории приведены в книгах Паули [P1] и Бергмана [B1].

Закончив работу, Вейль направил один из экземпляров Эйнштейну с просьбой представить ее Прусской академии наук [W3]. Эйнштейн ответил: «Ваши идеи отличаются замечательной последовательностью. Не касаясь вопроса о соответствии реальности, могу сказать, что это грандиозное достижение ума» [E31]. Конечно, Эйнштейну не нравилось, что линейный элемент не является более инвариантом. Получается, что длина стержней и показания часов должны зависеть от их предыстории [E32], а это вступает в противоречие с наблюдениями, согласно которым все атомы водорода, вне зависимости от их происхождения, имеют одинаковый спектр. Тем не менее, Эйнштейн позаботился о публикации работы Вейля, но добавил к ней короткое примечание, в котором сделал оговорки [E33][12]). Ответ Вейля не отличался убедительностью. Спустя несколько месяцев он писал Эйнштейну: «[Ваши замечания] сильно беспокоят меня, поскольку опыт показывает, что Вашей интуиции можно доверять» [W4].

Эта теория долго не прожила, а локальные калибровочные преобразования уцелели, хотя и не в первоначальном смысле перекалибровки длин и времен. В конце 20-х годов Вейль ввел современный вариант этих преобразований: локальные фазовые преобразования волновых функций вещества. Эта новая концепция, должным образом развитая, стала одним из наиболее мощных инструментов теоретической физики.

§ 17.5. Дальнейший путь: хронология научных работ

Последний период научной деятельности Эйнштейна проходил под знаком единой теории поля. Это, однако, не означает, что он не интересовался квантовой теорией. В течение последних 30 лет Эйнштейн добивался достижения четко поставленной перед собой цели, хотя и не представлял себе, какими методами ее можно достичь. В конце научного пути он напоминал путешественника, которому часто приходится в дороге менять виды транспорта. Но пункта назначения Эйнштейн так и не достиг.

---

[12]) В 1921 г. Эйнштейн опубликовал не очень интересную заметку, где, в духе Вейля, рассматривал теорию относительности, в которой инвариантом является только $g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = 0$ [E34].

Наиболее характерные черты его работы в эти годы — почти те же, что и раньше: верность избранному пути, энтузиазм и в то же время способность безболезненно, без сожалений и колебаний отказаться от одной стратегии и тут же начать разрабатывать другую. На протяжении двух десятилетий Эйнштейн каждые пять лет пытался строить пятимерные теории. В промежутках между этими попытками и позднее он разрабатывал то тот, то иной подход с использованием четырехмерных связностей. Кроме того, он занимался проблемами ОТО (о которых уже говорилось в гл. 15) или размышлял над основами квантовой теории (о чем речь пойдет в гл. 25).

Рассказывая о единой теории поля, я решил прибегнуть к хронологии научных работ, для того чтобы показать, как упорно стремился Эйнштейн к поставленной цели, как разнообразны были его методы и как бесплодны усилия. В перечне работ, посвященных объединению, читатель найдет и другие статьи, включенные в хронологию для полноты картины. Те работы, в которых идет речь о пятимерном подходе (уже обсуждавшиеся в § 17.2), помечены крестиком. Прежде чем перейти к хронологии, подчеркну, что, пытаясь обобщить ОТО, Эйнштейн руководствовался тремя мотивами. Во-первых, он хотел объединить тяготение с электромагнетизмом. Во-вторых, ему никак не удавалось получить свободные от сингулярностей решения уравнений поля ОТО без источников, которые можно было бы идентифицировать с частицами; он надеялся, что это удастся сделать в рамках более общих теорий. В-третьих, он рассчитывал, что эти теории помогут лучше понять квантовую теорию (гл. 26).

1922 г.+. Исследование совместно с Громмером свободных от сингулярностей решений уравнений Калуцы.

1923 г. Четыре коротких статьи [E35—E37, E38] о программе построения единой теории поля Эддингтона. В 1921 г. Эддингтон, вдохновленный работой Вейля, предложил свою теорию [E39]. Как мы видели, Вейль в качестве основных понятий ввел симметричную связность и симметричный фундаментальный тензор. В работе Эддингтона первичным понятием служит только симметричная связность $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}$; симметричный фундаментальный тензор вводится «с черного хода». В теории такого рода тензор Риччи $R_{\mu\nu}$ несимметричен (хотя связность и симметрична). Положим

$$R_{\mu\nu} = R^{(+)}_{\mu\nu} + R^{(-)}_{\mu\nu}, \tag{17.45}$$

где первый (второй) член представляет собой симметричную (антисимметричную) часть. Величина $R^{(-)}_{\mu\nu}$ не только антисимметрична; более того, она является ротором: из уравнения (17.27) следует, что

$$\left.\begin{aligned} R^{(-)}_{\mu\nu} &= (1/2)\,(\partial\varphi_\mu/\partial x^\nu - \partial\varphi_\nu/\partial x^\mu), \\ \varphi_\mu &= \Gamma^{\lambda}_{\mu\lambda} \end{aligned}\right\} \tag{17.46}$$

[напомним, что в римановом случае с учетом (17.29) $R^{(-)}_{\mu\nu} = 0$].

Поэтому Эддингтон предположил, что $R^{(-)}_{\mu\nu}$ играет роль электромагнитного поля.

Отметим далее, что

$$ds^2 = (1/\lambda)\, R_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = (1/\lambda)\, R^{(+)}_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu \qquad (17.47)$$

— скаляр, где λ — некоторая константа. Определим $g_{\mu\nu}$ так:

$$R^{(+)}_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}. \qquad (17.48)$$

Это уравнение родственно уравнению Эйнштейна с космологической постоянной. Тогда метрику можно вывести из (17.47) и (17.48), а не постулировать.

Тензор Риччи, являющийся суммой метрики и тензора электромагнитного поля, выглядит довольно странно. В 1923 г. Вейль заявил, что эта теория «не заслуживает обсуждения» [W5], а Паули писал Эддингтону: «В отличие от Вас и Эйнштейна, я считаю мнение математиков о том, что можно построить некую геометрию на основе аффинной связности без [лежащего в основе] линейного элемента, не имеющим в данный момент никакого значения для физики» [P6].

О теории Эддингтона Эйнштейн сразу же отозвался как о красивой форме, не наполненной содержанием [E40]. Тем не менее, он начал размышлять над этими идеями и в конце концов решил, что «...обязательно должен опубликовать что-нибудь свое, так как идею Эддингтона нужно разработать до конца» [E41]. Эти слова взяты из его письма Вейлю. Тремя днями позже Эйнштейн вновь написал ему: «Я вижу холодную, как мрамор, улыбку безжалостной Природы, которая щедро наделила нас стремлениями, но обделила умственными способностями» [E42]. Так, романтически, началось увлечение Эйнштейна общими связностями, увлечение, не оставлявшее его до последних часов жизни.

Эйнштейн поставил перед собой задачу ответить на вопрос, не полностью рассмотренный Эддингтоном: какой вид имеют уравнения поля для 40 фундаментальных величин $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$, заменяющие десять уравнений поля с $g_{\mu\nu}$ в ОТО? Уравнения, которые он смог найти, имеют вид

$$\Gamma^\lambda_{\mu\nu} = \Gamma^{*\lambda}_{\mu\nu} - (1/2)\, g_{\mu\nu}i^\lambda + (1/6)\,(\delta^\lambda_\mu i_\nu + \delta^\lambda_\nu i_\mu), \qquad (17.49)$$

где $\Gamma^{*\lambda}_{\mu\nu}$ — правая часть уравнения (17.21), а i^λ истолковываются как источники электромагнитного поля. Но здесь Эйнштейн натолкнулся на непредвиденное затруднение — оказалось невозможным вывести уравнения Максвелла для поля без источников! Кроме того, остается нерешенной старая проблема, на что и жалуется Эйнштейн: «Эта теория ничего не говорит о строении электронов» [E38], в ней нет свободных от сингулярностей решений.

В 1925 г. Эйнштейн упомянул об этих двух трудностях в добавлении к немецкому изданию книги Эддингтона о теории

относительности. «К сожалению, полученный результат создает у меня впечатление, что углубление геометрических основ, предпринятое Вейлем и Эддингтоном, не смогло привести к прогрессу физических знаний» [Е43].

1924—1925 гг. Три статьи по газу Бозе — Эйнштейна; это был последний крупный вклад Эйнштейна в физику (гл. 23).

1925 г. Эйнштейном впервые предложена собственная единая теория поля. Это также первый пример публичного выражения необоснованного оптимизма по поводу одного из вариантов единой теории поля; вскоре он отказался от этой идеи. «После двухлетних непрерывных поисков нам удалось получить истинное решение»,— писал Эйнштейн во вступительном абзаце своей короткой статьи [Е44].

В этом новом варианте п связность, и лежащий в основе фундаментальный тензор $g^{\mu\nu}$ несимметричны. Таким образом, имеется 80 фундаментальных полей, каждое из которых варьируется независимо в соответствии с вариационным принципом

$$\delta \int g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \sqrt{g}\, d^4x = 0, \tag{17.50}$$

где $R_{\mu\nu}$ — вновь тензор Риччи (как отмечалось ранее, это по-прежнему тензор). Конечно, уравнение (17.50) очень похоже на вариационный принцип в ОТО. Действительно, уравнение (17.21) получается в симметричном пределе (что неудивительно, так как в данном случае все сводится к методу Палатини [Р1]). В общем случае связь между $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}$ и $g_{\mu\nu}$ может быть получена только с точностью до произвольного 4-вектора.

Эйнштейн пытался отождествить симметричную часть $g_{\mu\nu}$ с тяготением, а антисимметричную часть $\varphi_{\mu\nu}$ с электромагнитным полем. Однако, вообще говоря, $\varphi_{\mu\nu}$ не является ротором. Ближе всего Эйнштейн смог подойти к первой системе уравнений Максвелла, показав, что в случае слабого поля

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha}\left(\frac{\partial \varphi_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial \varphi_{\nu\alpha}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial \varphi_{\alpha\mu}}{\partial x^\nu}\right) = 0. \tag{17.51}$$

На этом статья заканчивается. Вскоре после ее публикации Эйнштейн и сам понял, что полученные результаты не впечатляют. Об этом свидетельствуют три его письма Эренфесту. В первом из них он пишет: «Я опять предложил теорию тяготения — электричества, очень красивую, но сомнительную» [Е45]. Во втором письме говорится: «Этим летом изложил на бумаге очень соблазнительные идеи о тяготении — электричестве... но сейчас у меня возникли серьезные сомнения в их правильности» [Е46]. Через два дня он признается: «Работа, которую я сделал этим летом, никуда не годится» [Е47]. В статье, написанной в 1927 г., Эйнштейн отмечает: «*...вследствие многочисленных неудач мы пришли к убеждению, что на этом пути* [Вейль → Эддингтон → → Эйнштейн] *нельзя продвинуться к истине*» (курсив мой.— *А. П.*) [Е48].

Работа, проделанная Эйнштейном, была независимо выполнена Картаном, впервые предложившим ввести несимметричные связности (антисимметричные части $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}$ сейчас известны под названием коэффициентов кручения Картана). Теоретики, занимающиеся ОТО, проявляют значительный интерес к такого рода построениям, называемым теориями Эйнштейна — Картана [113]. Основная цель состоит в том, чтобы связать кручение со спином. Это, однако, не имеет ничего общего с объединением, и сам Эйнштейн никогда не занимался такими проблемами.

1927 г.[+] Возврат к теории Калуцы. Предложенный Эйнштейном новый подход оказывается идентичным работам Клейна. В январе 1928 г. он пишет Эренфесту о том, что именно это правильный путь: «Да здравствует пятое измерение!» [E49]. Спустя полгода Эйнштейн вновь вернулся к связностям.

1928 г. Все упоминавшиеся выше попытки унификации объединяет то, что в них стандартная ОТО могла бы (по крайней мере, таковы были надежды) как-то быть получена из более общих соображений. Следующая работа Эйнштейна необычна тем, что в ней он с самого начала отказался от наиболее характерной черты «старой» теории — наличия не равного нулю тензора кривизны, выраженного через связности посредством уравнения (17.26).

Начало этой попытке было положено чисто математической работой [E50], большой редкостью для Эйнштейна; в ней он самостоятельно ввел понятие далекого параллелизма (называемого также абсолютным параллелизмом или телепараллелизмом). Если воспользоваться формализмом предыдущего параграфа, то предложенная геометрия выглядит следующим образом. Рассмотрим контравариантный репер с набором четырех ортонормированных векторов h^{ν}_{a}, $a = 1, 2, 3, 4$ — номер вектора, ν — номер его компонент. Предположим, что такой репер может *как целое* оставаться параллельным самому себе при произвольном смещении, т. е. $h^{\nu}_{a;\mu} = 0$ для каждого a, или, в явном виде:

$$\partial h^{\nu}_{a}/\partial x^{\mu} + \Gamma^{\nu}_{\lambda\mu} h^{\lambda}_{a} = 0 \qquad (17.52)$$

для каждого a. Если это возможно, то, очевидно, можно ввести понятие прямой линии (не путать с геодезической) и параллельных линий. Пусть $h_{\nu a}$ есть нормированный минор определителя h^{ν}_{a}. Тогда (здесь подразумевается суммирование по a)

$$h_{\rho a} h^{\nu}_{a} = \delta^{\nu}_{\rho}. \qquad (17.53)$$

Такая запись приемлема, поскольку $h_{\nu a}$ — ковариантное векторное поле. Из уравнений (17.52) и (17.53) можно получить выражение для связности:

$$\Gamma^{\nu}_{\lambda\mu} = -h_{\lambda a}\partial h^{\nu}_{a}/\partial x^{\mu}, \qquad (17.54)$$

откуда, как легко заключить,

$$R^{\mu}_{\nu\lambda\sigma} = 0. \qquad (17.55)$$

Таким образом, далекий параллелизм возможен только в случае

особого вида несимметричной связности, когда 64 величины $\Gamma^{\varphi}_{\lambda\mu}$ могут быть выражены через 16 полей и тензор кривизны равен нулю. Когда Эйнштейн получил эти результаты, он не знал, что такая геометрия уже была создана Картаном [13]).

Все перечисленные выше свойства не зависят от метрики. Можно, однако, определить инвариантный линейный элемент $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ с

$$g_{\mu\nu} = h_{\mu a}h_{\nu a}. \qquad (17.56)$$

Получающуюся в результате геометрию риманову геометрию с кручением, и создал самостоятельно Эйнштейн. Неделей позже он предложил использовать такой подход к объединению [E51a]. Конечно, ему предстояло сделать что-то из ряда вон выходящее, поскольку здесь нет тензора Риччи. Однако Эйнштейну удалось найти новый тензор, который можно было использовать, тензор, определяемый выражением

$$A^{\lambda}_{\nu\mu} = \Gamma^{\lambda}_{\nu\mu} - \Gamma^{*\lambda}_{\nu\mu}, \qquad (17.57)$$

где $\Gamma^{*\lambda}_{\mu\nu}$ получается из правой части уравнения (17.21) [из (17.25) следует, что $A^{\lambda}_{\nu\mu}$ действительно является тензором]. Он надеялся отождествить $A^{\lambda}_{\nu\lambda}$ с электромагнитным потенциалом, однако даже в случае слабого поля наткнулся на старое затруднение — невозможность получить уравнения, в которых гравитационное и электромагнитное поля были бы разделены. Так все и оставалось в последующие несколько месяцев, а затем стали происходить странные события.

В газете «New York Times» 4 ноября 1928 г. появилась статья под заголовком «Эйнштейн на пороге великого открытия, но не терпит любопытства», а 14 ноября — заметка «Эйнштейн проявляет сдержанность по поводу новой работы. Он не хочет „делить шкуру неубитого медведя“». Сам Эйнштейн никак не мог быть источником этих слухов, о которых также упоминалось в журнале «Nature» [N2], так как во всех этих заметках ошибочно утверждалось, что он работает над книгой по новой теории. На самом деле Эйнштейн в это время работал над короткой статьей, посвященной новому варианту теории объединения, в которой используется далекий параллелизм. Как бы то ни было, 11 января 1929 г. он сделал краткое заявление для прессы, в котором заявил: «...задачей моей работы является дальнейшее упрощение теории и... сведение к одной формуле, объединение поля тяготения и электромагнитного поля»,— а также сослался на короткую (на шести страницах) статью, представленную для

---

[13]) См. письмо Картана Эйнштейну [C6] (в котором Картан отмечает, что он упоминал об этой геометрии в беседе с Эйнштейном в 1922 г.) в опубликованной переписке Картана с Эйнштейном [D1]. В 1929 г. Эйнштейн написал обзор этой теории [E51], к которому Картан по его предложению добавил историческую справку [C7].

публикации накануне [E52]. Заявление Эйнштейна сопровождалось следующим бессмертным образцом журналистской прозы: «Объем данной работы, которая писалась со скоростью полстраницы в год, следует считать огромным, если учесть, что первоначальное изложение его теории относительности [25 ноября 1915 г.] заняло всего три странички» [N3]. «Эйнштейн поражен суматохой, которую вызвала его работа. Он держит в напряженном ожидании сотню журналистов»,— писала та же газета неделю спустя, тут же отмечая, что ему самому не было никакого дела до рекламы. Но имя Эйнштейна уже стало магическим, и вот что писал ему чуть позже Эддингтон: «Вас, возможно, позабавит то, что один из крупных лондонских универмагов... выставил в витрине Вашу статью (все шесть страниц, наклеенных на стекло), чтобы прохожие могли ее прочитать. Около этой витрины собираются огромные толпы!» [E53]. В воскресном издании «New York Times» от 3 февраля 1929 г. под рубрикой «Гвоздь номера» на всю полосу была помещена статья Эйнштейна о раннем этапе разработки теории относительности; в конце этой статьи шла речь о далеком параллелизме, и пораженные читатели узнавали, что в данной геометрии параллелограммы оказываются незамкнутыми [14]). Шумиха была так велика, что Эйнштейну пришлось на время исчезнуть со сцены [N4].

Как оказалось, это было много шуму из ничего. Эйнштейн обнаружил, что

$$B^{\lambda}_{\mu\nu} = \Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} - \Gamma^{\lambda}_{\nu\mu} \tag{17.58}$$

— тензор третьего ранга, как непосредственно следует из уравнения (17.25), и отождествил $B^{\lambda}_{\lambda\nu}$ с электромагнитными потенциалами. Он предложил систему уравнений поля, но добавил, что «...более глубокое исследование... должно показать, действительно ли [они] дают адекватное понимание физических свойств пространства» [E52]. От попыток вывести свои уравнения из вариационного принципа [E54] ему пришлось отказаться [E55]. Тем не менее, в 1929 г. у него не было «...практически никаких сомнений» в том, что он на правильном пути [E56]. Эйнштейн прочитал лекции по этой теории в Англии [E57] и во Франции [E58], а также в популяризованном виде изложил идеи далекого параллелизма в серии статей [E59 — E62]. Один из его сотрудников писал об этой теории, как о «...теории, к которой Эйнштейн относится очень серьезно и постоянно подчеркивает ее важность на протяжении ряда лет» [L1].

На коллег Эйнштейна его старания не произвели большого впечатления. Серьезную критику высказывали Эддингтон [E63] и Вейль [W6] (мнения других ученых отражены в [L2, W7]).

---

[14]) Рассмотрим четыре прямые линии $L_1, \ldots, L_4$. Пусть L_1 и L_2 параллельны. Пусть L_3 пересекает L_1 и L_2. Через точку на L_1, не находящуюся на L_3, проведем линию L_4, параллельную L_3. В этом случае линии L_4 и L_2 не обязательно пересекаются.

Паули требовал объяснить, как быть с перигелием Меркурия, искривлением лучей света и с законами сохранения энергии-импульса [P7]. Эйнштейн не мог дать ответа на все эти вопросы [E64], но похоже, что это не очень его беспокоило, судя по письму Вальтеру Майеру, написанному неделей позже. «Почти все коллеги отрицательно реагируют на данную теорию, поскольку в ней вновь ставится под сомнение справедливость раннего варианта ОТО» [E65]. Паули в обзорной статье, написанной на эту тему в 1932 г., подверг Эйнштейна уничтожающей критике: «Неистощимая изобретательность [Эйнштейна], а также завидная энергия, с которой он стремится к [объединению], гарантировали нам в последние несколько лет появление в среднем одной теории в год... С психологической точки зрения интересно отметить, что в течение некоторого времени каждая очередная предложенная теория обычно представляется ее автору „окончательным решением“» [P8].

Эйнштейн продолжал упорствовать. В 1930 г. он работал над частными случаями решений своих уравнений [E66] и начал поиск тождеств, которые и без вариационного принципа могли бы играть роль, аналогичную роли тождеств Бьянки в традиционной теории [E67]. В 1931 г. вышла еще одна работа о тождествах [E68]. После этого он сдался. В заметке, написанной для журнала «Science», Эйнштейн отметил, что этот путь был неверен [E26] (о его более поздних взглядах на далекий параллелизм см. [S5]). Вскоре он признался в этом Паули: «Все-таки Вы оказались правы, негодник!» [E69]. Через полгода после появления последней статьи о далеком параллелизме Эйнштейн вновь вернулся к пяти измерениям.

1931—1932 гг.* Разработка теории локальных пятивекторных пространств Эйнштейна — Майера.

1933 г. В спенсеровской лекции, о которой упоминалось в гл. 16, Эйнштейн выражает убеждение в том, что чисто математические построения позволяют открывать физические понятия и объединяющие их законы [E70]. Я отказываюсь верить, что это все тот же Эйнштейн, который в 1917 г. убеждал Феликса Клейна не переоценивать важности формальной точки зрения, которая «... редко срабатывает как средство эвристического поиска» [E2].

1935 г. Статья с Розеном и Подольским об основах квантовой теории.

1925—1938 гг. Работы по традиционной ОТО: самостоятельная — о гравитационных линзах, совместно с Розеном о гравитационных волнах и двулистных пространствах, и с Инфельдом и Хофманом о проблеме движения.

1938—1941 гг.* Последние работы по теории Калуцы — Клейна, написанные совместно с Бергманом и Баргманом.

Начало 40-х годов. Проявляет интерес к вопросам о том, могут ли наиболее фундаментальные уравнения физики иметь структуру, отличную от привычных дифференциальных уравне-

ний в частных производных. Работа совместно с Баргманом над бивекторными полями [E71, E72] (гл. 28) может считаться такого рода поисковым исследованием. Авторы считали, что ее результат не обязательно будет иметь отношение к физике. Другие работы такого рода, выполненные совместно с Эрнстом Страусом [S6], остались неопубликованными [15]).

С 1945 г. до конца жизни. Получены последние уравнения. В последние десять лет жизни, когда ему было уже за шестьдесят, Эйнштейн вернулся к своей старой привязанности, теории, которой он занимался с 1925 г.; в ней и фундаментальный тензор и связность несимметричны. Сначала Эйнштейн предположил, что эти величины комплексны, но эрмитовы [E73] (см. также [E74]). Однако без значительных изменений отсюда легко перейти к вещественным несимметричным выражениям (как позже и поступил Эйнштейн), поскольку здесь по-прежнему сохраняется группа вещественных точечных преобразований G_4, в которой не смешиваются вещественные и мнимые части величин g и Γ. Две упоминавшиеся выше статьи он написал самостоятельно, так же как и работы о тождествах Бьянки [E75] и о месте в его теории дискретных масс и зарядов [E76]. Основная часть следующей статьи, посвященной той же проблеме, была выполнена в сотрудничестве со Страусом [E77] (см. также [S7]), а еще две — с его последним ассистентом Брурией Кауфман [E78, E79]. Вскоре после смерти Эйнштейна Кауфман кратко доложила эту работу на конференции в Берне [K6]. В этом четком и информативном докладе проведено сравнение с работами, которые вели по несимметричным связностям почти одновременно с Эйнштейном Шрёдингер [S3] и Бехрам Курсуноглу [K7] [16]).

Судя по числу статей, в последние десять лет жизни Эйнштейн гораздо активнее рассматривал несимметричный случай, чем в 1925 г. Методы подхода к решению этой проблемы менялись несколько раз. В начале краткого обзора перечисленных выше работ вновь напомню о том общем подходе, который излагался в предыдущем параграфе; там отмечалось, что для детального описания связности важно определить свойства тензора третьего ранга $Q_{\mu\nu\rho}$ [уравнение (17.24)]. Из этой предпосылки и исходил Эйнштейн. В 1945 г. он постулировал следующее соотношение:

$$g_{\mu\nu;\rho} \equiv \partial g_{\mu\nu}/\partial x^{\rho} - g_{\lambda\nu}\Gamma^{\lambda}_{\mu\rho} - g_{\mu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\rho\nu} = 0. \qquad (17.59)$$

Из свойств преобразований величин $g_{\mu\nu}$ [которые вне зависимости от того, симметричны они или нет, преобразуются старым

---

[15]) Выражаю благодарность проф. Баргману и проф. Страусу за обсуждение работ того периода.

[16]) Шрёдингер первичным понятием считал только связность, а фундаментальный тензор вводил при помощи приема Эддингтона с космологическим членом. Теория Курсуноглу напоминает теорию Эйнштейна, но в ней имеется один дополнительный параметр. О несимметричных связностях можно также прочитать в [L3, S8, T1].

добрым способом; см. уравнение (17.22) и последующие комментарии], а также $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}$ [уравнение (17.25)] следует, что уравнение (17.59) является ковариантным постулатом. Более того, теперь, когда мы излечились от далекого параллелизма, вновь получаются нетривиальные выражения для тензоров кривизны и Риччи, задаваемые соответственно уравнениями (17.26) и (17.27). Кроме того, определенную роль играет величина Γ_{μ}, задаваемая выражением

$$\Gamma_{\mu} = (1/2)\,(\Gamma^{\lambda}_{\mu\lambda} - \Gamma^{\lambda}_{\lambda\mu}), \tag{17.60}$$

причем Γ_{μ} — 4-вектор [см. (17.25)], который в римановом случае становится тождественно равным нулю. На этой основе предполагалось построить теорию, в которой (как и в теории 1925 г.) симметричная и антисимметричная части $g_{\mu\nu}$ отождествлялись бы соответственно с метрикой и электромагнитным полем; после этого можно было бы посмотреть, дает ли такая теория решения для частицеподобных объектов. В 1925 г. из такого подхода ничего не вышло. Провалился он и на этот раз. Ниже кратко изложены основные полученные результаты.

А. В уравнении (17.59) важно соблюдать порядок индексов в величинах Γ; этот порядок был выбран таким, что уравнение (17.59) оставалось справедливым при замене $g_{\lambda\mu} \to g_{\mu\nu}$, $\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} \to \Gamma^{\lambda}_{\nu\mu}$. Эйнштейн и Кауфман распространили данное правило на нетривиальное ограничение, согласно которому все окончательные уравнения теории должны быть инвариантны относительно операции перестановки. [Величина $R_{\lambda\mu}$ не инвариантна относительно перестановки; окончательные уравнения инвариантны. Индексы в уравнении (17.26) имеют тот же порядок, что и в работе Эйнштейна с сотрудниками.]

Б. В симметричном случае уравнение (17.21) является следствием уравнения (17.59). В данном случае это не так.

В. Величина $g_{\mu\nu}$ есть приведенное представление группы; симметричная и антисимметричная части не смешиваются при преобразовании относительно G_4. Следовательно, объединение тяготения с электромагнетизмом формально произвольно. «По этой причине Паули показывает мне язык каждый раз, когда я заговариваю с ним об [этой теории]» [E80]. Попытка устранить данное возражение путем расширения группы G_4 оказалась безуспешной [17]).

Г. Как и в 1925 г., вариационный принцип задается здесь уравнением (17.50). После сложных вычислений Эйнштейн с

---

[17]) Идея заключалась в том, чтобы потребовать инвариантность относительно $\Gamma^{\sigma}_{\mu\nu} \to \Gamma^{\sigma}_{\mu\nu} + \delta^{\sigma}_{\mu}\partial\lambda/\partial x^{\nu}$, где λ — произвольная скалярная функция. В таком случае величина $\Gamma^{\sigma}_{\mu\nu}$ должна быть несимметричной, а $R_{\mu\nu}$ в то же время оставаться инвариантом. Однако окончательное уравнение $\Gamma_{\mu} = 0$ не инвариантно относительно этого нового преобразования.

сотрудниками получил уравнения поля вида

$$\left.\begin{aligned} &g_{\mu\nu;\rho}=0, \quad \Gamma_\mu=0, \quad \underset{\sim}{R_{\mu\nu}}=0, \\ &\underset{\sim}{R_{\mu\nu;\lambda}}+\underset{\sim}{R_{\lambda\mu;\nu}}+\underset{\sim}{R_{\nu\lambda;\mu}}=0, \end{aligned}\right\} \tag{17.61}$$

первое из которых идентично уравнению (17.59); поэтому оно перестает быть постулатом и становится следствием вариационного принципа. Величины $\underset{\sim}{R_{\mu\nu}}$ и $\underset{\sim}{R_{\mu\nu}}$ есть соответственно симметричная и антисимметричная части $R_{\mu\nu}$.

Это были последние уравнения поля, полученные Эйнштейном.

В декабре 1954 г. он писал: «С моей точки зрения, изложенная здесь теория является логически простейшей релятивистской теорией поля, возможной вообще. Но это не значит, что природа не может подчиняться более сложным теориям поля» [E81]. Необходимо, однако, отметить, что опять логическая простота не только не позволила получить новые физические результаты, но и не дала возможности воспроизвести старые. Как и в 1925 г. [см. (17.51)], Эйнштейн не смог даже вывести уравнения электромагнитного поля для случая слабых полей [K6, с. 234]. Для меня остается загадкой, почему он решил игнорировать этот результат, полученный им 30 лет назад. В итоге ни одна из попыток Эйнштейна обобщить риманову связность так и не позволила ему получить уравнения Максвелла для свободного поля.

В 1949 г. Эйнштейн написал новое приложение к третьему изданию книги «Сущность теории относительности», где он изложил суть своих последних работ по объединению. Не его вина, что одна из страниц рукописи[18]) была перепечатана на первой полосе «New York Times» под заголовком «Новая теория Эйнштейна дает ключ к познанию Вселенной» [N5]. Он отказался встретиться с репортерами и попросил Элен Дюкас передать им следующее: «Навестите меня лет через двадцать» [N6]. Прошло три года, и статья Эйнштейна вновь наделала шуму в прессе, но уже в последний раз. Он переписал приложение к четвертому изданию той же книги, и его уравнения (17.61) появились в «New York Times» под заголовком «Эйнштейн предлагает новую теорию, объединяющую законы мироздания» [N7].

«Как прекрасно чувство узнавания объединяющих черт в сложных явлениях, которые воспринимаются как совершенно не связанные между собой»,— писал Эйнштейн Гроссману в 1901 г. [E82], закончив свою первую в жизни статью по статистической физике. Это прекрасное чувство не оставляло его всю жизнь, которую он посвятил науке, и помогало сохранить ясность мысли. Ему ни разу не изменило чувство гармонии. Пусть же последними словами о единой теории поля будут слова, написанные самим Эйнштейном: «Допустим, скажет скептик, что эта система

---

[18]) Издательство «Princeton University Press» выставило эту рукопись на заседании Ассоциации содействия развитию науки в Нью-Йорке.

действительно разумна с логической точки зрения. Но этим еще не доказано, что она соответствует природе. Вы правы, дорогой скептик. Только опыт может решить, где же скрыта истина» [E83].

§ 17.6. Постскриптум к объединению, прелюдия к квантовой теории

Задача объединения взаимодействий сейчас единодушно считается одной из самых важных задач физики, может быть, самой важной. Даже если бы Эйнштейн учел то обстоятельство, что помимо гравитационного и электромагнитного в природе имеются и другие взаимодействия (а он мог это сделать), то на его работы это вряд ли оказало бы влияние — час объединения тогда еще не наступил.

Паули, хорошо знакомый с работами по единой теории поля и одно время активно работавший в этой области, был чем-то вроде Мефистофеля при Фаусте-Эйнштейне. Он любил повторять, что не человеку объединять то, что разделил господь; позднее оказалось, что это замечание хотя и остроумно, но не справедливо. В 70-е годы в теориях объединения удалось добиться первых неоспоримых успехов. Электромагнетизм удалось объединить, правда, не с тяготением, а со слабыми взаимодействиями. Попытки объединить эти силы с сильными взаимодействиями позволили создать многообещающие, но еще не окончательные теории, известные под названием теорий великого объединения.

Пока, как и во времена Эйнштейна, объединение тяготения с остальными известными фундаментальными силами все еще остается мечтой. Есть слабая надежда на то, что в рамках теории супергравитации (см. [Z1]) удастся что-нибудь сделать для этого окончательного объединения и тем самым положить конец нашему незнанию природы тензора $T_{\mu\nu}$, по поводу чего так часто сокрушался Эйнштейн.

Пытаясь расширить рамки общей теории относительности, Эйнштейн с самого начала преследовал две цели. Во-первых, объединить тяготение с электромагнетизмом таким образом, чтобы из новой теории поля можно было получить свободные от сингулярностей решения, соответствующие частицам; об этом уже шла речь выше. Во-вторых, он хотел заложить основы квантовой физики, иными словами, объединить теорию относительности и квантовую теорию.

О том, как Эйнштейн представлял себе великое объединение законов физики, и будет идти речь в следующей части книги, посвященной квантовой теории. В ней мы вновь встретимся с молодым Эйнштейном в триумфальном для него 1905 г.

Обособленно... 4. Отдельно от других; порознь, независимо, индивидуально...

Оксфордский словарь английского языка

Глава 18. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

§ 18.1. Обзор работ Эйнштейна

В 1948 г. я взялся за составление юбилейного сборника, посвященного 70-летию Эйнштейна [R1]. В письмах возможным авторам я писал: «Предполагается, что первая статья сборника будет посвящена в основном личности Эйнштейна и что в ней автор воздаст ему должное от имени всех остальных» [P1]. Затем я обратился к Роберту Эндрюсу Милликену с просьбой взять на себя роль основного автора [1]). Его статья написана с присущей ему прямотой. В ней об уравнении, описывающем фотоэлектрический эффект, $E = h\nu - P$ Милликен сказал: «Я потратил десять лет жизни на проверку уравнения Эйнштейна 1905 г. и вопреки всем ожиданиям был вынужден в 1915 г. недвусмысленно признать его справедливость, несмотря на то что оно казалось безрассудным, так как противоречило всему, что было известно об интерференции света» [M1].

Физика не стояла на месте, а Милликен смягчился с тех пор, как написал в 1915 г. статью о фотоэффекте; об этом можно судить, сравнив статью 1948 г. с тем, что говорилось в той ранней работе: «Похоже, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта... каждый раз позволяет получить результат, в точности соответствующий эксперименту... Однако полукорпускулярная теория, при помощи которой Эйнштейн получил свое уравнение, представляется сейчас совершенно несостоятельной» [M2]. В следующей работе Милликен упоминал о «...смелой, если не сказать безрассудной, гипотезе электромагнитных корпускул света» [M3]. Милликен был не единственным первоклассным физиком, который придерживался в то время таких взглядов. Все физическое общество отнеслось к гипотезе световых квантов с недоверием и скептицизмом, граничащим с насмешкой. Как один из основателей «старой» квантовой теории, создававшейся до 1925 г., Эйнштейн быстро ощутил восторженную поддержку разработанной им квантовой теории удельной теплоемкости. (Другое дело, нуждался ли он в такой поддержке.) Однако с 1905 по 1923 г.

[1]) Позднее было решено, что Л. де Бройль, М. Лауэ и Ф. Франк также напишут статьи о личности Эйнштейна.

он был единственным или почти единственным, кто всерьез относился к световым квантам; в этом смысле он был обособлен.

Для того чтобы лучше понять ранние этапы становления квантовой физики, необходимо выяснить, чем было вызвано столь критическое отношение к гипотезе Эйнштейна о световых квантах, выдвинутой им в 1905 г. Это был беспрецедентный случай в научной деятельности Эйнштейна. Работы, написанные им до 1905 г., не привлекли большого внимания, да они его и не заслуживали. Однако статья о броуновском движении была сразу же признана и оценена очень высоко. Так же случилось и с теорией относительности. М. Планк стал сторонником специальной теории относительности через несколько месяцев после ее опубликования; молодое поколение физиков также стало сразу пользоваться новой теорией. Лоренц, Гильберт, Ф. Клейн и другие следили за развитием идей Эйнштейна в области общей теории относительности, и после 1915 г. все они тут же стали работать над ее дальнейшим развитием. Отношение к попыткам Эйнштейна создать единую теорию поля было в основном критическим. Многие считали их преждевременными, но мало кто полностью отвергал основную идею, лежащую в основе этой теории. В квантовой же теории Эйнштейн был обособлен от других, и так было всегда — с 1905 г. и до конца его дней. В эти годы можно выделить два периода, о первом из которых (с 1905 по 1923 г.) уже шла речь выше. В течение второго периода, с 1926 г. до самой смерти, он был практически единственным, кто очень скептически относился к квантовой механике. Более подробно об отношении Эйнштейна к квантовой механике мы поговорим в гл. 25, но я хочу сразу заявить, что скептицизм Эйнштейна не имел ничего общего с полным отрицанием этого научного направления. Он действительно всю жизнь критически относился к квантовой механике, но при этом у него была собственная альтернативная программа создания синтетической теории, в которой нашлось бы место и частицам, и полям, и квантовым явлениям. Еще до создания квантовой механики, в 1920 г. Эйнштейн начал работать над осуществлением этой программы и занимался ею до конца жизни. Наши частые беседы в последние годы его жизни помогли мне лучше понять его взгляды.

Но вернемся к временам «старой» квантовой теории. То, что сделал в ней Эйнштейн, можно резюмировать следующим образом.

Световые кванты. В 1900 г. М. Планк установил закон излучения черного тела, не используя при этом понятия световых квантов. В 1905 г. Эйнштейн открыл световые кванты, не используя закон распределения Планка. Гипотезе световых квантов посвящена гл. 19. Там же обсуждается взаимное влияние идей Планка и Эйнштейна, а также кратко рассказано об истории фотоэлектрического эффекта с 1887 по 1915 г. В конце гла-

вы подробно рассмотрены причины, по которым статья о световых квантах вызвала столь отрицательную реакцию.

Удельная теплоемкость. К концу XIX в. обнаружился конфликт между данными измерений удельной теплоемкости и их толкованием с использованием теоремы равнораспределения классической статистической механики. В 1906 г. Эйнштейн закончил первую работу, посвященную квантовым эффектам в твердых телах. В ней было показано, как разрешить парадоксы, и кроме того, она сыграла важную роль в окончательной формулировке третьего закона термодинамики. Об этом пойдет речь в гл. 20.

Фотон. Световой квант первоначально определили как сгусток энергии; лишь постепенно вызревала концепция фотона как частицы с определенными энергией и импульсом. Сам Эйнштейн не упоминал об импульсе фотона до 1917 г. Релятивистские соотношения, описывающие закон сохранения энергии-импульса, были сформулированы лишь в 1923 г. Участие Эйнштейна в этой работе обсуждается в гл. 21, в которой рассказано о том, как в 1909 г. Эйнштейн ввел понятие корпускулярно-волнового дуализма электромагнитного излучения, получил коэффициенты A и B, впервые проявил беспокойство по поводу нарушения классической причинности. В конце главы приведено несколько соображений об эффекте Комптона.

У читателя может возникнуть недоумение: почему ученый, установивший соотношение $E = h\nu$ для света в 1905 г. и создавший в том же году специальную теорию относительности, не вывел тут же соотношение $p = h\nu/c$?

Работы по квантовой статистике. Эти статьи Эйнштейна рассмотрены в гл. 23; там же говорится и о вкладе Бозе.

Вклад в создание волновой механики. Речь о роли Эйнштейна в переходный период создания волновой механики пойдет в гл. 24.

Мы еще поговорим о вкладе Эйнштейна в квантовую теорию в § 18.3, но сначала мне бы хотелось на время оставить нашего главного героя и подробнее прокомментировать ту уникальную роль, которую сыграл фотон в физике частиц и полей. В ходе своего рассказа я буду иногда отклоняться от исторической последовательности событий, с тем чтобы оценить те или иные факты с позиций сегодняшнего дня.

§ 18.2. Физика частиц: первые 50 лет

Оставим пока фотон в стороне и посмотрим, как реагировали физики на экспериментальное обнаружение или теоретическое предсказание (в зависимости от того, что было раньше) других новых частиц. Учитывая краткость замечаний, я не буду приводить здесь подробных ссылок на литературу.

Открытие в 1897 г. первой частицы — электрона было неожиданным экспериментальным фактом, положившим конец дискуссиям о том, являются катодные лучи молекулярными пучками или же эфирными возмущениями. Ответ был совершенно неожиданным: ни то, ни другое, а новая форма вещества. Некоторые поначалу даже отказывались в это верить. Дж. Дж. Томсон однажды вспоминал о реакции одного из коллег на его первую лекцию, посвященную новому открытию: «Один из крупных физиков, присутствовавший на моей лекции, через довольно продолжительный отрезок времени рассказал мне, что он был уверен, будто я морочу всем голову» [T1]. Тем не менее, через несколько лет существование электрона было широко признано. К 1900 г. стало ясно, что β-излучение — это также электроны. Открытие свободных электронов и обнаружение эффекта Зеемана (1896) со всей очевидностью показали, что найден универсальный компонент атома и что источником атомных спектров являются возбужденные состояния электронов.

Открытие электрона было открытием на *внешней* экспериментальной границе. Оно, прежде всего, повлекло за собой отказ от устаревшего качественного представления о неделимости атома, но не потребовало, по крайней мере немедленно, полного пересмотра всей теоретической физики.

В течение последующих 50 лет аналогичным образом, т. е. в результате неожиданных экспериментальных открытий на внешней границе, были обнаружены еще три частицы. Это — протон (вернее, ядро), нейтрон [2]) и открытый почти через полвека после электрона первый из его более массивных родственников мюон. Как бы физики ни относились к этим частицам, каждый раз выяснялось, что их появление открывает новые возможности. Через два года после появления на свет модели ядра Резерфорда Бору удалось впервые правильно предсказать некоторые явления в атомной физике. Практически сразу же после открытия нейтрона были предложены первые жизнеспособные модели ядра, и с этого времени ядерная физика начала развиваться по-настоящему. Мюон по-прежнему является одним из самых странных членов семейства элементарных частиц, но и его обнаружение способствовало прогрессу, так как помогло понять некоторые аномалии в поглощении космических лучей. (Еще до открытия мюона теоретики поговаривали о необходимости введения новой частицы для объяснения этих аномалий.)

---

[2]) Часто, и не без оснований, утверждают, что нейтрон был фактически предсказан. За 12 лет до его обнаружения Резерфорд в одной из своих Бейкеровских лекций (в 1920 г. [R2]) говорил о «... возможности существования атома с единичной массой и нулевым зарядом ядра». Идея о существовании нейтрона носилась в воздухе в Кавендише, и это, несомненно, в значительной степени облегчило его открытие Джеймсом Чедвиком [C1]. Однако даже Резерфорд не мог предвидеть, что его нейтрон образца 1920 г. (считавшийся тогда тесно связанной протон-электронной системой) будет столь разительно отличаться от частицы, которой было присвоено это имя.

Для полноты перечня частиц, известных к концу первой половины нашего века, необходимо упомянуть еще четыре (гравитон включать сюда пока рано); эти частицы были первоначально введены теоретически. Нейтрино предложили впервые для того, чтобы спасти закон сохранения энергии при β-распаде.

Первый мезон (называемый сейчас пионом) был введен как переносчик ядерных сил. Предложения о введении этих частиц были, конечно, изобретательными, смелыми, новаторскими и плодотворными, но они не требовали радикального пересмотра той или иной теории. Через несколько месяцев после первого упоминания в литературе гипотезы существования нейтрино была создана первая теория слабых взаимодействий, которой с большим успехом пользуются до наших дней. Предсказание существования мезона также привело к крупным теоретическим разработкам.

С гипотезой существования нейтрино ученые смирились задолго до того, как эта частица была действительно обнаружена. От момента выдвижения гипотезы о существовании нейтрино до его обнаружения прошло даже больше времени, чем в случае фотона. Предсказание о существовании мезона было скоро подкреплено экспериментальными данными, полученными в результате исследований космических лучей; так во всяком случае казалось. Лишь через десять с лишним лет стало ясно, что большинство полученных результатов относилось к мюонам, а не к пионам.

Дальше идет позитрон, «...новый тип частицы, неизвестной в экспериментальной физике и имеющей ту же массу, что и электрон, но противоположный заряд» [D1]. Эта частица была предложена в 1931 г. после трех лет бурных споров о смысле решений уравнения Дирака с отрицательной энергией. В то время один из физиков высказал опасение по поводу возможности «...нового кризиса в квантовой физике» [W1]. Кризис, однако, был непродолжителен. Экспериментальное обнаружение позитрона в 1932 г. явилось триумфом теоретической физики. Теория позитрона принадлежит к числу крупнейших достижений 30-х годов.

И кроме того, был фотон — первая из предсказанных теоретически частиц.

Ни в первой половине нашего века, ни позднее ни одна идея о введении новой частицы не наталкивалась на столь упорное сопротивление, как гипотеза о существовании фотона. Гипотеза световых квантов воспринималась как ересь даже ведущими физиками, которые в остальном относились к Эйнштейну с огромным уважением. Фотон был признан только после самой длительной и ожесточенной борьбы за всю историю физики частиц. Это объясняется тем, что по сей день ни одна частица, помимо фотона, не приводила к созданию новой *внутренней* границы. Сама гипотеза содержала парадокс: известно, что свет есть вол-

на, следовательно, он не может состоять из частиц. Но даже этот парадокс не полностью объясняет, почему столь сильно было сопротивление гипотезе Эйнштейна. Подробнее мы поговорим об этом в § 19.6.

§ 18.3. Квантовая теория: линии влияния

Приведенная ниже схема является попыткой представить историю создания квантовой теории в простейшей форме. Кроме того, эта схема послужит своего рода планом дальнейшего изложения. Стрелки, обозначенные символами M и R, указывают на то, что влияние оказывалось соответственно через теорию вещества и излучения.

Если Планк, Эйнштейн и Бор были отцами квантовой теории, то ее дедушкой был Густав Роберт Кирхгоф. Поскольку он был

Квантовая теория: линии влияния

основоположником спектроскопии (совместно с Робертом Бунзеном, 1860 г. [К1]), одна из стрелок ведет от него и Бунзена к Иоганну Якобу Бальмеру — автору формулы, названной его именем [В1]. От Бальмера мы движемся к Бору — основателю атомной квантовой динамики. Возвращаясь к Кирхгофу как открывателю универсального характера излучения черного тела [К2], отмечаем, что его работы оказали влияние на Вина, а через него на Планка (более подробно об этом говорится в § 19.1).

Стрелка, которая направлена от Вина к Планку, соответствует формулировке последним закона излучения черного тела, а треугольник Вин — Планк — Эйнштейн соответствует их взаимному влиянию, приведшему к выдвижению гипотезы световых квантов (§ 19.2—19.4).

Стрелка, ведущая от Бозе к Эйнштейну, соответствует работе Бозе об электромагнитном излучении и ее влиянию на вклад Эйнштейна в квантовую статистику реального газа (см. гл. 23, где также упоминается о том влиянии, которое Эйнштейн оказал на Дирака).

Треугольником Эйнштейн — де Бройль — Шрёдингер отражена та роль, которую Эйнштейн сыграл в переходный период создания волновой механики, о чем говорится в гл. 24.

Символ h на стрелке, идущей от Планка к Бору, служит напоминанием о том, что решающую роль в формировании представлений Бора о стабильности атома сыграли не столько детали работ Планка об излучении, сколько сам факт введения Планком новой универсальной постоянной h. Вопрос о влиянии идей Бора на работы Гейзенберга, а также о влиянии на Дирака теорий Гейзенберга и Шрёдингера выходит за рамки данной книги.

В случае Эйнштейна и Бора нельзя сказать, что работы одного из них оказали значительное влияние на другого, поэтому на этой схеме и нет стрелки, соединяющей их имена. Тем не менее в течение 40 лет Эйнштейн и Бор оказывали воздействие друг на друга, и довольно сильное, но по-иному. Дружески, но упорно отстаивая свои взгляды, два великих ученых вели спор по фундаментальным вопросам. В гл. 22 рассказано о том, как Бор сопротивлялся идее фотона, предложенной Эйнштейном. Но это было лишь эпизодом, так как существование фотона было доказано в ходе тщательной экспериментальной проверки, после чего Бор снял свои возражения. Гораздо более важная дискуссия по основам квантовой механики началась между ними в 1927 г. Эта интеллектуальная схватка, в которой столкнулись их наиболее фундаментальные представления, продолжалась до конца жизни Эйнштейна. На карту были поставлены критерии, которые лежат в основе суждения о полноте описания физического мира. Спор Бора с Эйнштейном не оказал влияния на развитие физической теории, но навсегда вошел в историю как конфликт научных принципов двух крупнейших ученых-современников.

Дискуссия Бора с Эйнштейном принесла и один положительный результат: Бору приходилось все время уточнять формулировки своей идеи дополнительности. Об этой дискуссии пойдет речь в гл. 25, где говорится о возражениях Эйнштейна против квантовой механики.

Следует, видимо, еще раз повторить то, что уже говорилось ранее: мнения Эйнштейна по многим проблемам физики часто противоречили общепринятым взглядам, но он никогда не занимал чисто негативную позицию. Так было и в случае кванто-

вой механики. После 1930 г. Эйнштейн считал, что эта теория последовательна и плодотворна, но неполна. В то же время он сам надеялся создать в будущем теорию, описывающую частицы и поля. Я поясню, что имеется в виду, в гл. 26.

По моему мнению, Эйнштейну не удалось привести убедительных аргументов в пользу своего тезиса о неполноте квантовой теории, но я считаю, что еще не настало время ответить на вопрос, действительно ли полно квантовомеханическое описание, поскольку по сей день физика полей и частиц изобилует многими неразрешенными фундаментальными проблемами. Одна из них была особенно близка Эйнштейну, и он (как, впрочем, и все остальные) безуспешно пытался решить ее,— это проблема объединения квантовой физики и общей теории относительности. В гл. 2 я уже упоминал, что еще многое предстоит сделать на пути к этому объединению. Поэтому оценку взглядов Эйнштейна на данную проблему, о чем говорится в гл. 26, естественно, надо рассматривать лишь как предварительную.

Глава 19. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

§ 19.1. От Кирхгофа к Планку

В последние четыре месяца 1859 г. произошел ряд событий, которым было суждено изменить ход развития науки.

Двенадцатого сентября Леверье представил Французской академии наук текст письма, написанного им Фаю, в котором речь шла о необъяснимом смещении перигелия Меркурия (§ 14.3); объяснение этого эффекта было дано Эйнштейном в ноябре 1915 г. Двадцать четвертого ноября вышла из печати книга Чарлза Роберта Дарвина «Происхождение видов путем естественного отбора, или сохранение благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь». В промежутке между этими двумя событиями, 20 октября Густав Кирхгоф из Гейдельберга обнаружил, что темные фраунгоферовы линии D в солнечном спектре становятся еще темней, если на пути лучей Солнца помещать пары горящего натрия [К1]. Через несколько недель он сформулировал по результатам наблюдений теорему, а также предложил задачу, с которой сам не смог справиться. Попытки решить эту задачу и привели в конце концов к созданию квантовой теории.

Рассмотрим некоторое тело, находящееся в тепловом равновесии с излучением. Предположим, что энергия излучения, поглощаемая телом, полностью переходит в тепловую энергию. Пусть $E_\nu d\nu$ — энергия, излученная 1 см^2 поверхности данного тела в единицу времени в интервале частот $d\nu$, а A_ν — коэффициент поглощения данного тела при частоте ν. Тогда, как гласит теорема Кирхгофа [К2], отношение E_ν/A_ν зависит только от частоты ν и температуры T, и на его значение не влияют ника-

кие другие характеристики тела:

$$E_\nu / A_\nu = J(\nu, T). \qquad (19.1)$$

Кирхгоф назвал тело черным, если $A_\nu = 1$. Таким образом, $J(\nu, T)$ есть излучательная способность черного тела. Он даже дал рабочее определение системы, которая ведет себя как черное тело: «Если взять полость, ограниченную со всех сторон телами, не пропускающими излучения и имеющими одинаковую температуру, то каждая порция излучения, заключенного в полости, будет иметь с точки зрения качества и интенсивности те же характеристики, как если бы это излучение порождалось черным телом, имеющим такую же температуру».

Кирхгоф поставил задачу как перед теоретиками, так и перед экспериментаторами: «Чрезвычайно важно определить вид этой функции [J]. Экспериментально определить ее очень трудно. Тем не менее есть основания надеяться, что она имеет простой вид, как и все прочие известные на сегодня функции, не зависящие от свойств отдельных тел» [K2].

Упоминание экспериментальных трудностей оказалось вполне обоснованным. Даже такое простое свойство функции J, как то, что она имеет ярко выраженный максимум, смещающийся в сторону более низких частот при снижении температуры, было надежно экспериментально установлено лишь через 20 лет [K3]. Экспериментаторам пришлось решить три основные задачи: 1) создать удобные в работе установки, имеющие свойства черного тела; 2) разработать приемники излучения достаточной чувствительности; 3) найти способ выполнять измерения в широком диапазоне частот. Лет сорок понадобилось, чтобы получить экспериментальные данные, необходимые для решения задачи, поставленной Кирхгофом.

Кирхгоф получил уравнение (19.1), показав, что его невыполнение приводит к возможности существования вечного двигателя второго рода. Новизна его теоремы заключалась не столько в самом ее содержании, сколько в достоверности и общности доказательства, полностью основанного на молодой еще тогда термодинамике. Прошло четверть века, прежде чем удалось добиться следующего успеха в теоретическом исследовании излучения черного тела.

В 1879 г. Йозеф Стефан на основе экспериментальных данных предположил, что полная энергия, излучаемая нагретыми телами, изменяется пропорционально четвертой степени абсолютной температуры [S1]. Это утверждение, вообще говоря, неверно. Точную формулировку дал в 1884 г. Больцман, в то время профессор экспериментальной физики в Граце. Он теоретически доказал, что закон Стефана точно выполняется только для черного тела. Доказательство Больцмана также основано на термодинамике, но в нем использовались некоторые положения еще более молодой ветви теоретической физики — теории электромагнетизма Максвелла.

В той полости, о которой писал Кирхгоф, тепловое излучение однородно, изотропно и неполяризовано; следовательно,

$$J(\nu, T) = (c/8\pi)\rho(\nu, T), \qquad (19.2)$$

где $\rho(\nu, T)$ — спектральная плотность — есть плотность энергии в единице объема при частоте ν. В данном случае закон Стефана — Больцмана имеет вид (V — объем полости)

$$E(T) = V\int \rho(\nu, T)\, d\nu = aVT^4. \qquad (19.3)$$

Этот закон был самым первым термодинамическим следствием теоремы Максвелла, в соответствии с которой радиационное давление численно равно одной трети энергии, заключенной в единице объема. Когда в 1893 г. Вильгельм Вин вывел закон смещения [W1]:

$$\rho(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T), \qquad (19.4)$$

было получено практически все, что можно извлечь из термодинамики и общей теории электромагнетизма. [Вывод уравнений (19.3) и (19.4) дан в учебниках.]

Первые предположения о том, какой вид может иметь функция ρ, стали выдвигаться еще в начале 60-х годов прошлого века. Из всех высказывавшихся догадок стоит вспомнить только об одной — об экспоненциальном законе Вина, предложенном им в 1896 г. [W2]:

$$\rho = \alpha\nu^3 \exp(-\beta\nu/T). \qquad (19.5)$$

К тому времени техника эксперимента уже позволяла проверить справедливость этой формулы, что и было сделано Фридрихом Пашеном из Ганновера, который выполнил измерения (очень хорошие) в ближней инфракрасной области для длин волн от 1 до 8 мкм при температуре 300—1600 К. Пашен опубликовал свои данные в январе 1897 г. и сделал следующий вывод: «Представляется, что очень трудно найти другую функцию [от ν и T, уравнение (19.5)], которая при столь небольшом числе констант соответствовала бы результатам измерений» [P1]. Недолгое время считалось, что Вин своим законом дал окончательное решение проблемы. Однако в 1900 г. выяснилось, что этот вывод преждевременный; тогда же был найден ответ на вопрос, поставленный Кирхгофом. Решающую роль при этом сыграли два фактора. Во-первых, удалось добиться значительного прогресса в экспериментальном исследовании дальней инфракрасной области. Во-вторых, большую настойчивость и дар предвидения проявил М. Планк.

В Берлине в Физико-техническом институте, имевшем, быть может, лучшее в мире физическое оборудование, эксперименты по излучению черного тела независимо друг от друга вели две группы ученых. В одну из них входили Отто Люммер и Эрнст Прингсгейм, которые исследовали еще неизученную область спектра с длинами волн от 12 до 18 мкм (при температурах

300—1650 К). В феврале 1900 г. они опубликовали свои результаты: в этой области закон Вина перестает работать [L1][1]). Вторая группа — в составе Генриха Рубенса и Фердинанда Курлбаума — исследовала еще более дальний инфракрасный диапазон, с длинами волн от 30 до 60 мкм при температурах 470—1770 К. Они пришли к точно такому же выводу [R1].

О результатах, полученных второй группой, мы поговорим позже, а пока мне хотелось бы остановиться на роли эксперимента в создании квантовой теории. Статья Рубенса и Курлбаума принадлежит к числу классических. Работа, выполненная ими, так же как работы Пашена и Люммера, а также Прингсгейма, была по своему характеру новаторской. К середине XIX в. измерения проводились до длин волн примерно 1,5 мкм. Продвижение вперед в последующие 40 лет было весьма медленным, как можно судить по вопросу, поставленному Самьюэлом Пирпонтом Лэнгли в лекции, которую он читал в 1885 г. на сессии Американской ассоциации содействия развитию науки: «Неужели предельная длина волны 2,7 мкм, пропускаемая нашей атмосферой, соответствует низшему пределу [частоты], который может быть получен от наземных источников?» [L2].

Наибольших достижений в этой области удалось добиться в 90-е годы прошлого века. Первая фраза первой статьи первого выпуска журнала «Physical Review» гласит: «В последние несколько лет удалось добиться больших успехов в изучении невидимого излучения благодаря систематическим исследованиям законов дисперсии инфракрасного излучения». Эти слова были написаны в 1893 г. Эрнестом Фоксом Никольсом. Примерно в то же время разрабатывались новые экспериментальные методики, кульминацией которых стал метод получения остаточного излучения, предложенный Рубенсом и Никольсом [R2]: в результате многократных отражений от поверхности кварца и других материалов удается убрать из пучка излучения коротковолновые составляющие и оставить лишь длинноволновые. Эти экспериментальные достижения имели фундаментальное значение для теории, являющейся главной темой нашего обсуждения,— квантовой теории, так как они сыграли решающую роль в установлении закона излучения черного тела.

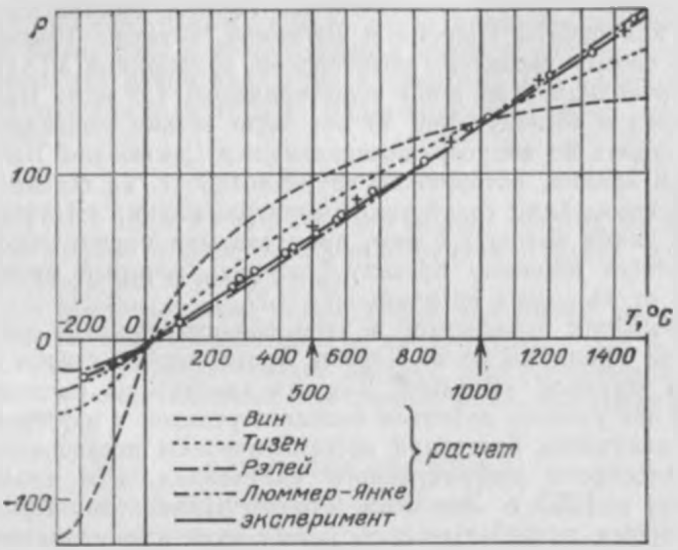
Работа Рубенса и Курлбаума была представлена в Прусскую академию наук 25 октября 1900 г. На графике приведены некоторые результаты измерений[2]), а также для сравнения расчетные кривые. Одна из этих кривых соответствует закону Вина, который, как видно в этом случае, не выполняется. Не подходит

---

[1]) Свидетельства об отклонении от закона Вина имелись и раньше, но они не были надежно подтверждены.

[2]) Излучение с длиной волны $\lambda = 51{,}2$ мкм, используемое в экспериментах, было получено в результате многочисленных отражений от кристаллов каменной соли. (Вспомним, что при многократных отражениях остаются непоглощенными те частоты, которые соответствуют частотам колебаний ионов решетки вещества-отражателя.)

и кривая, предложенная Рэлеем (к работам Рэлея мы вернемся в § 19.3). Я не буду останавливаться на двух других расчетных кривых, приведенных там для сравнения, и перейду к наиболее важной «...пятой формуле, предложенной господином М. Планком уже после завершения наших экспериментов... [которая] в пределах погрешностей измерений соответствует нашим результатам [в интервале температур от 85 до 1773 К]» [R1]. Кирхгоф переехал из Гейдельберга в Берлин, чтобы возглавить кафедру теоретической физики. После его смерти это место предложили



Пример данных Рубенса и Курлбаума, которые помогли Планку угадать его формулу [R1]. Интенсивность излучения ρ отложена в зависимости от температуры T при $\lambda = 51{,}2$ мкм. Кривые, обозначенные «Вин» и «Рэлей», соответствуют наилучшему совпадению с экспериментом уравнений (19.5) и (19.17). Кривая, отвечающая формуле Планка, здесь еще не отложена

Больцману, но тот отказался. Такое же предложение сделали Генриху Герцу, но он его также отклонил. Следующим кандидатом был Планк, которому предложили сначала должность экстраординарного профессора. Он принял предложение и вскоре стал профессором. Новая должность позволила ему быть непосредственным свидетелем тех событий, о которых шла речь выше. Это обстоятельство было одним из решающих факторов, повлиявших на судьбу этого исключительного человека.

Вероятнее всего[3]), Планк открыл свой закон рано вечером в воскресенье 7 октября. В тот день семейство Планков навестили

[3]) Здесь я полагаюсь на сведения, почерпнутые из некролога Рубенсу, написанного Герхардом Гетнером [H1], который сам был специалистом по излучению черного тела. Сведения Гетнера несколько отличаются от воспоминаний Планка, написанных, когда ему было под девяносто [P2].

Рубенс с женой. Рубенс рассказал Планку, что по его данным величина $\rho(\nu, T)$ пропорциональна T при малых ν. Не успели гости уйти, как Планк сел за работу и сразу понял, что нужно изменить в законе Вина, описываемом уравнением (19.5), чтобы он соответствовал результату Рубенса. В тот же вечер он отправил Рубенсу открытку с полученной им формулой, а 19 октября в ходе дискуссии после представления работы Курлбаумом он предложил ее публично [P3]. В обозначениях, введенных Планком через два месяца, его формула имеет вид

$$\rho(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3)[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}. \qquad (19.6)$$

Уравнение (19.6) содержит в себе закон Вина 1896 г.:

$$\rho(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3)\exp(-h\nu/kT) \quad \text{при} \quad h\nu/kT \gg 1, \qquad (19.7)$$

который действительно справедлив в квантовом режиме $h\nu/kT \gg 1$; это условие выполняется в упоминавшихся выше экспериментах Пашена ($h\nu/kT \approx 15$ при $T = 1000$ К и $\lambda = 1$ мкм). Как это ни странно, квантовая теория была предложена лишь после того, как в дальней инфракрасной области обнаружились классические отклонения от квантового режима.

Было бы совершенно несправедливо по отношению к Планку считать, что его открытие — результат только интерполяции данных эксперимента. Он на протяжении нескольких лет пытался вывести верный закон излучения, исходя из наиболее фундаментальных соображений. Поэтому не столько удивительна быстрота, с которой он получил результат, сколько справедливость этого результата. Я не могу здесь останавливаться ни на предыдущих работах Планка (см. [K4]), ни на том, как он пришел к своей догадке. Однако для того, чтобы правильно понять, из чего исходил Эйнштейн в 1905 г. и чем была вызвана негативная реакция на его гипотезу о световых квантах, совершенно необходимо вкратце рассказать о деятельности Планка в героический период его жизни, с октября по декабрь 1900 г.

Даже если бы Планк ничего больше не сделал в физике после 19 октября, он все равно вошел бы в историю как автор закона излучения. Величие Планка состоит в том, что он пошел дальше. Он хотел дать толкование уравнения (19.6) и в результате стал основателем квантовой теории. Ниже я кратко перечислю три основных этапа его работы [P4].

Электромагнитный этап. Здесь речь пойдет о результате, полученном Планком чуть раньше [P5]. Рассмотрим линейный осциллятор массой m и зарядом e, взаимодействующий с монохроматическим периодическим электрическим полем (частотой ω) в направлении своего движения. Уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{x} + f\dot{x} - (2e^2/3c^3)\dddot{x} = eF\cos(2\pi\omega t). \qquad (19.8)$$

Пусть ν — частота свободного осциллятора, $f/m = (2\pi\nu)^2$. Рассмотрим случай, когда затухание излучения, описываемое чле-

ном, содержащим x, пренебрежимо мало, т. е. $\gamma \ll \nu$, где $\gamma = 8\pi^2 e^2 \nu^2/3mc^3$. Тогда x можно приближенно заменить величиной $-(2\pi\nu)^2 x$. Решение уравнения (19.8) можно записать в виде [P6]: $x = C\cos(2\pi\omega t - \alpha)$. Отсюда легко получаются значения C и α. Энергия осциллятора E равна $m(2\pi\nu)^2 C^2/2$, откуда получаем

$$E = (e^2F^2/2m)[4\pi(\nu - \omega)^2 + \gamma^2]^{-1}. \qquad (19.9)$$

Представим электрическое поле в виде некогерентного изотропного излучения с суперпозицией частот, находящегося в условиях теплового равновесия при температуре T. Тогда равновесная энергия осциллятора U получается заменой плотности энергии электрического поля $F^2/2$ в уравнении (19.9) величиной $4\pi\rho(\omega, T)d\omega/3$ с последующим интегрированием по ω:

$$U = \frac{4\pi e^2}{3m}\int \frac{\rho(\omega, T)\,d\omega}{4\pi(\nu - \omega)^2 + \gamma^2}. \qquad (19.10)$$

Так как γ очень мало, возмущение осциллятора будет максимальным при $\omega = \nu$. Таким образом, можно заменить $\rho(\omega, T)$ величиной $\rho(\nu, T)$ и провести интегрирование от $-\infty$ до $+\infty$, что даст выражение

$$\rho(\nu, T) = (8\pi\nu^2/c^3)U(\nu, T). \qquad (19.11)$$

Это уравнение для радиационного равновесия вещества и излучения — один из важнейших результатов, полученных Планком в классической физике,— стало отправным пунктом квантовой теории. Как мы увидим ниже, это же уравнение было использовано в 1905 г. Эйнштейном при критике подхода Планка и создании им квантовой теории удельной теплоемкости.

Термодинамический этап. Из анализа уравнения (19.11) Планк заключил, что для нахождения ρ достаточно определить U. (В § 19.2 мы еще подробно остановимся на этом с виду невинном утверждении.) Использовав уравнения (19.6) и (19.11), он нашел U. Затем Планк определил энтропию S линейного осциллятора, проинтегрировав уравнение $T\,dS = dU$, где T считается функцией U (при фиксированной частоте ν). В результате он получил

$$S = k[(1 + U/h\nu)\ln(1 + U/h\nu) - (U/h\nu)\ln(U/h\nu)]. \qquad (19.12)$$

Когда выведено уравнение (19.12), формулу (19.6) можно получить как его следствие.

Статистический этап. Правильнее было бы сказать, что Планк считал этот этап статистическим. Рассмотрим большое число N линейных осцилляторов, имеющих одинаковую частоту ν. Пусть $U_N = NU$ и $S_N = NS$ — соответственно полная энергия и энтропия данной системы. Положим $S_N = k\ln W_N$, где W_N — термодинамическая вероятность. Затем следует квантовый постулат.

Предполагается, что полная энергия U_N представляет собой совокупность *конечных* порций энергии ε: $U_N = P\varepsilon$, где P — боль-

ное число. Обозначим символом W_N число способов, которыми P *неразличимых* порций энергии могут быть распределены по N *различимым* осцилляторам. Например, для $N=2$, $P=3$ реализуются такие распределения: $(3\varepsilon, 0)$, $(2\varepsilon, \varepsilon)$, $(\varepsilon, 2\varepsilon)$, $(0, 3\varepsilon)$. В общем случае

$$W_N = (N-1+P)!/P!(N-1)!. \qquad (19.13)$$

Подставим это выражение в $S_N = k \ln W_N$, используем соотношения $P/N = U/\varepsilon$, $S_N = NS$ и воспользуемся приближением Стирлинга. В результате получим

$$S = k[(1+U/\varepsilon)\ln(1+U/\varepsilon) - (U/\varepsilon)\ln(U/\varepsilon)]. \qquad (19.14)$$

Из уравнений (19.4) и (19.11), а также из соотношения $T\,dS = dU$ следует, что S есть функция только U/ν. Поэтому

$$\varepsilon = h\nu. \qquad (19.15)$$

Таким образом, вновь получается уравнение (19.12). Так родилась квантовая теория. Вывод формулы Планка был впервые доложен 14 декабря 1900 г.

Для физики начала века логика электромагнитного и термодинамического этапов была безупречной, но зато статистический этап выглядел совершенно дико. Он, несомненно, был нужен для того, чтобы от уравнений (19.13)—(19.15) вернуться к уравнению (19.12). В 1931 г. Планк вспоминал об этом как об «отчаянном шаге»: «Мне обязательно нужно было получить положительный результат при любых обстоятельствах и любой ценой» [112]. На самом деле он предпринял не один, а два «шага отчаяния». Во-первых, Планк сделал неслыханную вещь, приписав физический смысл конечным «порциям энергии» [см. (19.15)]. Во-вторых, он использовал также небывалую процедуру подсчета, описываемую уравнением (19.13). По мнению Планка, «электромагнитная теория излучения не дает нам отправного пункта, который позволял бы говорить о конкретной вероятности $[W_N]$» [97]. Это утверждение, конечно же, неверно. Как будет показано в § 19.2, классический закон равнораспределения позволял Планку использовать конкретный способ определения любых термодинамических параметров, но не давал возможности получить результат, к которому он стремился.

Оставим, однако, пока в стороне вопрос о том, что мог сделать Планк и чего он не сделал, и вернемся к его неортодоксальному подходу к принципу Больцмана. В своих статьях Планк упоминал о том сильном влиянии, которое оказали на него статистические методы Больцмана [4]). Но Больцман определял наиболее вероятный способ, которым заданное число различимых молекул газа с фиксированной полной энергией может быть распределено по ячейкам фазового пространства. Соответствующая задача подсчета, обсуждавшаяся в § 4.2, не имеет ничего общего с методом

[4]) В январе 1905 и в январе 1906 г. Планк выдвигал кандидатуру Больцмана на присуждение Нобелевской премии.

подсчета Планка, при котором выполняется распределение *неразличимых* объектов — порций энергии. Действительно, этот новый метод подсчета, предвосхищающий метод, использованный Бозе и Эйнштейном четверть века спустя, никак не укладывается в рамки классического мышления. Планк не только понимал это, но и прямо заявил по поводу уравнения (19.13): «Опыт покажет, реализуется ли *эта гипотеза* [курсив мой.— *А. П.*] в природе» [P7][5]).

Таким образом, единственным оправданием двух отчаянных шагов служит то, что они позволили Планку получить желаемый результат. Его подход был безумным, но это безумие имело тот божественный оттенок, который привносят в науку только крупнейшие фигуры в переломный период. Это «безумие» сделало Планка, консерватора по характеру, революционером поневоле. У Планка были и образ мысли и предрассудки человека XIX столетия, и все же он пошел на первый концептуальный разрыв с прошлым, изменив тем самым весь облик физики нашего столетия, сделав ее совершенно не похожей на физику прошлого. И хотя после декабря 1900 г. было сделано много других крупных открытий, мир не видел более другой такой фигуры, как Планк.

С 1859 по 1926 г. проблема излучения черного тела находилась на переднем крае теоретической физики — сначала в термодинамике, затем в электромагнетизме, потом в старой квантовой теории и, наконец, в квантовой статистике. К 1900 г. экспериментаторы получили верные данные, позволявшие проверить формулу Планка. Как сказал в 1903 г. Прингсгейм: «Уравнение Планка настолько хорошо согласуется с экспериментом, что его можно считать, по крайней мере с высокой степенью приближения, математическим выражением функции Кирхгофа» [P8]. Это утверждение справедливо до сих пор. В последующие годы происходило лишь уточнение полученных ранее результатов.

То высокое качество, которого удавалось добиваться пионерам экспериментальной физики, можно проиллюстрировать следующими примерами. В 1901 г. на основе опытных данных Планк получил для своей константы значение $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ эрг·с [P9]; современное значение составляет $6{,}63 \cdot 10^{-27}$ эрг·с, или $6{,}63 \times \times 10^{-34}$ Дж·с. Для постоянной Больцмана он получил значение $1{,}34 \cdot 10^{-16}$ эрг·К$^{-1}$; современное значение равно $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ эрг$\times \times$К$^{-1}$, или $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$. Используя полученное им значение постоянной Больцмана k, Планк определил постоянную Авогадро из соотношения $R = Nk$, где R — универсальная газовая постоянная. Затем из второго закона электролиза Фарадея $F = Ne$ он получил значение $e = 4{,}69 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ [P7]. Наиболее точное известное на сегодняшний день значение составляет $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ, или $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. В ходе измерений, выполнявшихся в то же время Дж. Дж. Томсоном [T1], для заряда

[5]) В работе [K4] сделано интересное предположение о том, что на вывод Планком формулы (19.13) могло повлиять одно из математических выражений в работах Больцмана.

электрона было получено $6{,}5 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ! Только в 1908 г., когда было установлено, что заряд α-частицы составляет $9{,}3 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ [R3], стало понятно, насколько близок к истине был результат, полученный Планком.

С самого начала работы Планка служили для Эйнштейна источником вдохновения, хотя и вызывали замешательство. В 1929 г., обращаясь к Планку, он сказал: «Прошло 29 лет с того времени, когда я... восторженно воспринял Ваш гениальный вывод формулы излучения... позволивший... совершенно по-новому применить статистический метод Больцмана» [E1]. В 1913 г. Эйнштейн писал о том, что работы Планка «...одновременно оживляют и затрудняют существование физика... Если можно было бы положить на весы все мозговое вещество, которое пожертвовали физики на алтарь этой универсальной функции [Кирхгофа], то получилась бы величественная картина, и этим жестоким жертвоприношениям не видно было конца!» [E2]. О своем первоначальном отношении к квантовой теории начала века Эйнштейн много позже писал: «...все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим новым результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить» [E3].

Из бесед с Эйнштейном я знаю, как он почитал Планка — основателя квантовой теории, как уважал этого человека, стойко переносившего невыразимые страдания, выпавшие на его долю, и трагедию своей страны. К Планку обращены эти слова благодарности: «Вы первый выступили в защиту теории относительности» [E4]. В 1918 г. Эйнштейн выдвинул кандидатуру Планка на присуждение Нобелевской премии (гл. 30). В 1948 г. после кончины Планка Эйнштейн писал: «Это открытие [создание квантовой теории] ... поставило перед наукой задачу: найти новую познавательную основу для всей физики. Несмотря на значительные частные достижения, проблема еще далека от удовлетворительного решения» [E4].

А теперь вернемся к раннему этапу создания квантовой теории. После 1901 г. в ней больше ничего не происходило до тех пор, пока Эйнштейн не выдвинул гипотезу световых квантов.

§ 19.2. Эйнштейн о Планке: 1905 г. Закон Рэлея — Эйнштейна — Джинса

Первые строки, опубликованные Эйнштейном по квантовой теории, были написаны в марте 1905 г. Эти строки — заглавие его первой работы о световых квантах «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» [E5, A1]. (В данной главе я буду называть эту работу мартовской статьей.) Толковый словарь английского языка Вебстера дает следующее определение термина «эвристический»: «который

может быть использован в качестве вспомогательного средства решения какой-либо проблемы, но не имеет обоснования или не подлежит обоснованию». Дальше я процитирую последние строки, которые Эйнштейн написал тоже в марте, но почти полвека спустя. В них речь также идет о квантовой теории. У этих двух фраз есть одна общая черта — обе они выражают мнение Эйнштейна о том, что квантовая теория по своей природе неокончательна. Упорство Эйнштейна в этом вопросе — одна из главных тем этой книги. В 1955 г. о квантовой теории судить можно было по-разному, но в 1905 г. мнение Эйнштейна было совершенно оправданно.

В мартовской статье Эйнштейн говорит об уравнении (19.6) как о «...формуле Планка, согласующейся со всеми проведенными до сих пор экспериментами». Но в чем же заключалась суть вывода этого уравнения, данного Планком? «...Несовершенства... [этого вывода] вначале были скрыты; это последнее обстоятельство было настоящим счастьем для развития физики» [E3]. В начале мартовской статьи в разделе, озаглавленном «Об одной трудности в теории „излучения черного тела"», Эйнштейн четко указывает на эти несовершенства.

Его простые аргументы основывались на двух несомненных следствиях классической теории. Первым из них было уравнение Планка (19.11), вторым — закон равнораспределения классической механики. Применительно к U в уравнении (19.11), т. е. к равновесной энергии одномерного вещественного гармонического осциллятора, этот закон дает

$$U(\nu, T) = (R/N)T, \tag{19.16}$$

где R — универсальная газовая постоянная, N — постоянная Авогадро, R/N (или k) — постоянная Больцмана (в течение ряда лет Эйнштейн не употреблял в своих работах символа k). Из уравнений (19.10) и (19.16) Эйнштейн нашел

$$\rho(\nu, T) = (8\pi\nu^2/c^3)(R/N)T \tag{19.17}$$

и тут же отметил, что это полученное из классической физики соотношение противоречит эксперименту и приводит в пределе к «катастрофическим» последствиям: $a = \infty$, где a — постоянная Стефана — Больцмана, фигурирующая в уравнении (19.3).

«Если бы Планк пришел к этому выводу, то он, может быть, не сделал бы своего великого открытия»,— писал позже Эйнштейн [E3]. Планк получил уравнение (19.11) в 1897 г. К тому времени закон равнораспределения был известен уже около 30 лет. В 90-е годы прошлого века, прежде чем вывести закон излучения, Планк сделал несколько ошибок. Одна из них — то, что он не смог первым вывести уравнение (19.17),— обернувшись удачей, сыграла в создании квантовой теории огромную роль. А вывести это уравнение он не смог потому, что до 1900 г. относился к идеям Больцмана, касающимся статистической механики, резко отрицательно.

Уравнение (19.17), известное как закон Рэлея — Джинса, как видно из приводимой ниже хронологии, имеет интересную и довольно забавную историю.

1900 г., июнь. Вышла небольшая статья Рэлея [R4], в которой впервые предложено применить к излучению «...доктрину распределения энергии Максвелла — Больцмана», т. е. закон равнораспределения. Из этой «доктрины» Рэлей вывел соотношение $\rho = c_1\nu^2 T$, но не определил значение константы c_1. Следует подчеркнуть, что данный вывод Рэлея выгодно отличается от подхода Планка тем, что в нем вообще не рассматриваются вещественные осцилляторы[6]). Рэлей также понял, что его соотношение следует толковать как предельный закон: «Предлагается [вместо закона Вина, уравнение (19.5)], когда $[T/\nu]$ *велико* (курсив мой.— *А. П.*), использовать соотношение $[\rho = c_1\nu^2 T]$»[7]). Для того чтобы избежать «катастрофы» при высоких частотах, Рэлей ввел экспоненциальный множитель и предложил такой закон излучения:

$$\rho(\nu, T) = c_1\nu^2 T \exp(-c_2\nu/T). \qquad (19.18)$$

Эта формула получила название «закон Рэлея». Как было показано выше, еще в 1901 г. Рубенс и Курлбаум (а также Люммер и Прингсгейм) обнаружили, что закон Рэлея несовершенен.

Итак, экспериментаторы, работавшие рядом с Планком, были хорошо знакомы с результатами Рэлея. Возникает вопрос, а не читал ли и Планк вышедшую за полгода до того, как он предложил свой закон, важную цитированную статью Рэлея? Как бы то ни было, в 1900 г. Планк не ссылался на работу Рэлея[8]).

1905 г., 17 марта и 9 июня. Эйнштейн вывел уравнение (19.17), упоминавшееся выше. Его статья была представлена 17 марта и вышла из печати 9 июня.

1905 г., 6 и 18 мая. В письме в журнале «Nature» (опубликованном 18 мая) Рэлей возвратился к своему закону $\nu^2 T$ и рассчитал значение c_1. В полученном им для c_1 результате не хватало множителя 8 [R5].

---

[6]) Планк вывел свой закон излучения обходным путем — через равновесные свойства вещественных осцилляторов. Он поступил так потому, что пытался одновременно ответить на два вопроса. Как устанавливается радиационное равновесие? Что такое равновесное распределение? Планк надеялся, что введение вещественных осцилляторов позволит дать ответ на оба вопроса. Рэлей же предусмотрительно сконцентрировал внимание только на втором вопросе. Он рассмотрел полость, заполненную «эфирными осцилляторами», и предположил, что они находятся в равновесии. Это позволило ему непосредственно применить закон распределения к своим осцилляторам.

[7]) Такое же утверждение было сделано независимо Эйнштейном в 1905 г. [E5].

[8]) Не ссылался на нее и Лоренц, давший в 1903 г. еще один вывод закона $\nu^2 T$ [L3]. Подробностями мы заниматься не будем и отметим лишь, что Лоренц получил верное значение константы c_1. Однако он сделал это не непосредственно, а прибегнув к длинноволновому пределу закона излучения Планка.

1905 г., 5 июня. В добавлении к одной из своих статей Джеймс Хопвуд Джинс исправил ошибку, допущенную Рэлеем. Эта статья вышла через месяц [J1]. В июле 1905 г. Рэлей выразил ему за это признательность [R6].

Из этой хронологии следует (хотя это и не так важно), что закон Рэлея — Джинса следовало бы по справедливости называть законом Рэлея — Эйнштейна — Джинса.

Я сделал это отступление, касающееся уравнения (19.17), не для того, чтобы отметить, кто и что сказал первым. Гораздо интереснее проследить, какую роль играло это уравнение на раннем этапе становления квантовой теории. С 1900 по 1905 г. формула излучения Планка считалась не более чем удачным способом описания опытных данных (см. [B1]). Лишь в 1905 г. некоторые (очень немногие) стали понимать, что в физике наступил кризис [E2]. Причиной этого кризиса явилось невыполнение закона Рэлея — Эйнштейна — Джинса.

По поводу невыполнения уравнения (19.17) как универсального закона Рэлей говорил, что «...следует признать несправедливость закона равнораспределения в экстремальных обстоятельствах», т. е. при высоких частотах [R5]. Джинс придерживался другого мнения: закон равнораспределения верен, но «...предположение о том, что энергия эфира находится в равновесии с веществом, абсолютно несправедливо в случае эфирных колебаний с небольшими длинами волн» [J2]. Итак, Джинс считал постоянную Планка h феноменологическим параметром, который может с успехом использоваться для расчетов, но не имеет фундаментального смысла. Споры о том, в чем здесь дело, в неравновесности или в несправедливости закона равнораспределения, продолжались еще не один год [H2]. Эта проблема поднималась и на первом Сольвеевском конгрессе в 1911 г., но к тому времени попытки объяснить все неравновесностью уже не вызывали интереса.

Мартовская статья — первая из шести работ, написанных Эйнштейном в 1905 г.— была закончена почти через год после того, как он направил в печать единственную опубликованную в 1904 г. статью [E6], где впервые упоминался Планк (§ 4.3). В этой статье имеется раздел, озаглавленный «О смысле постоянной x в атомно-кинетической теории»; x равно половине постоянной Больцмана. В последнем разделе «Применение к излучению» речь идет о флуктуациях энергии излучения относительно значения, соответствующего тепловому равновесию. Эйнштейн в то время от изучения второго закона термодинамики перешел к поиску метода определения k или (что практически то же самое) постоянной Авогадро N. Тогда же он начал идти от статистической физики к квантовой физике. После статьи 1904 г. наступил годичный перерыв. У него родился первый сын. Он получил первое постоянное место работы в патентном бюро. Мне кажется, что в течение этого года Эйнштейн много и интенсивно ду-

мал. Вскоре в разд. 2 мартовской статьи он дал первый из многочисленных предложенных им позднее методов определения значения N: сравнил уравнение (19.17) с экспериментальными данными для больших длин волн и получил

$$N = 6{,}17 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \qquad (19.19)$$

Это значение совпало с тем, которое получил из своего закона излучения Планк, но, как заметил Эйнштейн, если вместо закона Планка (19.6) использовать уравнение (19.17), то из фундаментальных соображений станет понятен ход рассуждений.

Через месяц после окончания работы над мартовской статьей в докторской диссертации он получил значение $N = 2{,}1 \times \times 10^{23}$ моль$^{-1}$. Эйнштейн не указал на то, что мартовское значение хорошо, а апрельское оставляет желать лучшего, по той простой причине, что точное значение N в то время не было известно. Я уже говорил о важной роли, которую сыграл метод определения N из броуновского движения, предложенный Эйнштейном в мае 1905 г. в уточнении значения N.

Перейдем теперь от классической части мартовской статьи к ее квантовой части.

§ 19.3. Гипотеза световых квантов и эвристический принцип

В гл. 3 я уже упоминал о том, что мартовская статья была единственной работой, которую сам Эйнштейн считал революционной. Посмотрим теперь подробней, что же в ней было революционного.

В 1905 г. Эйнштейн считал, что уравнение (19.6) согласуется с экспериментом, но противоречит теории, в то время как уравнение (19.17) соответствует теории, но не согласуется с опытом. Поэтому он поставил перед собой задачу рассмотреть излучение черного тела по-новому, не основываясь на «...каких-либо представлениях о возникновении и распространении излучения», т. е. не используя формулы Планка (19.11). Но тогда нужно было найти какую-то замену этому уравнению. Эйнштейн решил рассматривать проблему излучения «...в связи с опытом», феноменологически. За новый отправной пункт он взял догадку Вина [уравнение (19.5)], справедливость которой была подтверждена экспериментально для больших значений $\beta\nu/T$, в области применения закона Вина (в режиме Вина). Эйнштейн постулировал существование световых квантов, проведя аналогию между излучением в режиме Вина и поведением классического идеального газа, состоящего из материальных частиц.

Эйнштейн начал с того, что по-своему вывел знакомую формулу конечного обратимого изменения энтропии S при постоянной температуре T для случая, когда n молекул газа занимают объем v, являющийся частью объема v_0:

$$S(v, T) - S(v_0, T) = (R/N)\ln(v/v_0)^n. \qquad (19.20)$$

Две с половиной страницы мартовской статьи посвящены выводу

к обсуждению этого результата. Все, что Эйнштейн сказал по этому поводу, упоминалось в § 4.4 после уравнения (4.15).

Рассмотрим теперь проблему излучения. Пусть $\varphi(\nu, T)d\nu$ — плотность энтропии на единицу объема в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. Тогда (ρ — вновь спектральная плотность)

$$\partial\varphi/\partial\rho = 1/T. \tag{19.21}$$

Предположим, что догадка Вина [уравнение (19.5)] справедлива. Тогда

$$\varphi = -(\rho/\beta\nu)[\ln(\rho/\alpha\nu^3) - 1]. \tag{19.22}$$

Рассмотрим излучение в полости объемом v. Тогда $S(\nu, v, T) = \varphi v\, d\nu$ и $E(\nu, v, T) = \rho v\, d\nu$ есть соответственно полная энтропия и энергия для данного объема в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. В режиме Вина выражение для S представляет собой тривиальное следствие уравнения (19.22), в результате чего получаем

$$S(\nu, v, E) - S(\nu, v_0, E) = (E/\beta\nu)\ln(v/v_0) = \\ = (R/N)\ln(v/v_0)^{N\beta\nu/R\beta\nu}. \tag{19.23}$$

Сравнив уравнения (19.23) и (19.20), придем к *гипотезе световых квантов* Эйнштейна: «Монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной $R\beta\nu/N$» ($\beta = h/k$, $R/N = k$, $R\beta\nu/N = h\nu$). Этот вывод, который звучит, как теорема, на самом деле является гипотезой, так как он основан на догадке Вина, нуждающейся в доказательстве, которое базировалось бы на фундаментальных соображениях. Итак, этот вывод — смесь чисто классической теоретической физики с результатами эксперимента, не поддающимися описанию в рамках классической теории. Гениальность автора гипотезы световых квантов заключается в том, что он интуитивно выбрал нужные опытные данные и верные максимально простые теоретические соображения. Невольно задумываешься: как вообще Эйнштейну пришло в голову воспользоваться в своем выводе зависимостью энтропии от объема? Возможно, это не покажется столь удивительным, если вспомнить, что за год до этого вопрос зависимости от объема представлялся ему весьма важным при анализе флуктуаций энергии излучения [см. текст после уравнения (4.14)].

Введение Эйнштейном понятия световых квантов в режиме Вина было первым шагом к представлению излучения как бозе-газа фотонов. Как и в случае закона излучения Планка, гипотеза световых квантов основана на положениях статистической механики. В идеях обоих ученых есть оттенок безумия, хотя в работе Эйнштейна этот оттенок заметить гораздо трудней. Однако вчитаемся в слова «независимых друг от друга» в формулировке его гипотезы. В 1925 г. стало ясно (благодаря Бозе и в особенности Эйнштейну), что фотонный газ подчиняется стати-

стике Бозе при *любых* частотах и что утверждение о статистической независимости квантов энергии, вообще говоря, *неверно*, равно как несправедлива аналогия с газом, на которой основано статистическое соотношение Больцмана [см. (19.20)]. Теперь также известно, что *не нужно предполагать* (как это неявно сделал в своем выводе Эйнштейн) сохранения общего числа квантов энергии. Гениальность это или везение, но в режиме Вина подсчет как по Больцману, так и по Бозе дает один и тот же результат, поскольку несохранение числа фотонов в данном случае роли практически не играет. Это требует некоторых пояснений, они будут даны в гл. 23.

Однако ничего революционного в этом нет. Физик начала века вполне мог считать гипотезу световых квантов всего лишь любопытным свойством свободного излучения, находящегося в тепловом равновесии, свойством, не имеющим физического значения. Исключительной смелостью отличался следующий шаг Эйнштейна, который, кстати, и принес ему в 1922 г. Нобелевскую премию.

Эвристический принцип: «...если монохроматическое излучение (достаточно малой плотности) в смысле зависимости энтропии от объема ведет себя как дискретная среда, состоящая из квантов энергии величиной $R\beta\nu/N$, то напрашивается вопрос, не являются ли и законы возникновения и превращения света такими, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии».

Другими словами, гипотеза световых квантов есть некое утверждение о квантовых свойствах свободного электромагнитного излучения, а эвристический принцип является распространением этих свойств света на взаимодействие света и вещества. Это был действительно революционный шаг.

Я сейчас оставлю вопрос о том, как Эйнштейн применил эвристический принцип (о чем мы поговорим в § 19.5), и поясню, почему после 1906 г. он не только стал пользоваться уравнением Планка (19.11), но даже взял его в качестве новой гипотезы.

§ 19.4. Эйнштейн о Планке: 1906 г.

В 1906 г. Эйнштейн еще раз вернулся к теории Планка 1900 г. К этому времени он уже понял, как извлечь из его закона излучения дополнительные результаты. Эйнштейн изменил точку зрения на подход Планка, обнаружив, что «теория Планка в действительности неявно использует ... гипотезу световых квантов» [E7]. Причины, по которым Эйнштейн изменил отношение к подходу Планка и по-новому посмотрел на связь теории Планка со своими идеями, можно резюмировать следующим образом:

1. Планк использовал соотношение, связывающее ρ и U, т. е. уравнение (19.11), вытекающее из классической механики и электродинамики.

2. Планк ввел квантование по U, а именно предложил выражение $U = Ph\nu/N$ [см. (19.12)—(19.15)].

3. Если согласиться со вторым шагом, чуждым классической теории, то нет причин доверять уравнению (19.11), непосредственно следующему из классической теории.

4. Эйнштейн ввел квантование по ρ: гипотезу световых квантов. При этом он не использовал соотношение между ρ и U [уравнение (19.11)].

5. Возникает вопрос, а нельзя ли найти взаимосвязь между планковским квантованием по U и эйнштейновским квантованием по ρ?

Эйнштейн ответил, что это действительно можно сделать, введя *новое предположение*: уравнение (19.11) справедливо также и в квантовой теории! Иначе говоря, он предложил пользоваться уравнением (19.11), несмотря на то, что в тех режимах, где большую роль играли квантовые эффекты, его теоретическое обоснование становилось загадочным. После этого Эйнштейн пересмотрел вывод закона Планка с учетом упомянутого выше нового предположения. Я опускаю здесь детали и привожу только итог его рассуждений: «...мы можем считать, что в основе теории Планка лежит следующее утверждение. Энергия [осциллятора Планка] может принимать только целочисленные значения, кратные величине [$h\nu$]; энергия [осциллятора Планка] при поглощении и испускании меняется скачком, а именно на целочисленное значение, кратное величине [$h\nu$]». Итак, еще в 1906 г. Эйнштейн высказал правильную догадку относительно основных свойств квантовомеханического вещественного осциллятора и его поведения при излучательных переходах. Как будет показано в § 19.6, Планк был совершенно не готов согласиться с подходом Эйнштейна, несмотря на то что тот поддерживал его идеи. Что касается Эйнштейна, то, приняв уравнение (19.11) хотя бы и в качестве гипотезы, он смог сделать еще один крупный шаг вперед: создал квантовую теорию удельной теплоемкости, о которой пойдет речь в гл. 20.

§ 19.5. Фотоэлектрический эффект: второе «явление» h

В мартовской статье Эйнштейна наиболее известен раздел, посвященный его объяснению фотоэлектрического эффекта. Я построю изложение этого вопроса следующим образом. После общих замечаний вкратце обрисую положение дел в данной области с 1887 по 1905 г. Затем расскажу об Эйнштейне, после чего мы посмотрим, как развивались события до 1916 г., когда гипотеза Эйнштейна получила экспериментальное подтверждение.

Сейчас спектроскопия фотоэлектронов представляет собой огромную область исследований со своими собственными научными журналами. Этим методом изучаются газы, жидкости и твердые тела, а применяется он повсюду — от физики твердого тела до биологии. Эта область исследований разветвилась на ряд направлений, таких, как спектроскопия ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. А в 1905 г. она пребывала в младенческом

состоянии. В нашем распоряжении имеется подробное описание положения дел в области фотоэлектричества за несколько месяцев до окончания Эйнштейном его работы о световых квантах — это первая обзорная статья по фотоэлектрическому эффекту, вышедшая в свет в декабре 1904 г. [S2]. Из нее видно, что в то время исследование фотоэлектричества находилось на переднем крае физики вместе с радиоактивностью, физикой катодных лучей и (в меньшей степени) волнами Герца.

В 1905 г. во всех этих областях техника эксперимента была очень несовершенной, но в каждой из них уже были сделаны основополагающие открытия. Неудивительно, что экспериментатор, в основном занимавшийся какой-то одной проблемой, мог вполне работать и над другой. Например, Герц впервые наблюдал фотоэлектрические явления (здесь имеется в виду только так называемый внешний фотоэффект) примерно в то же время, когда продемонстрировал электромагнитную природу света. Два школьных учителя — Юлиус Эльстер и Ханс Гейтель — выполнили пионерские исследования фотоэффекта в вакууме и построили первые фотоэлементы [E8]; они также выполнили ряд фундаментальных экспериментов в области радиоактивности. Пьер Кюри с сотрудниками первыми обнаружили, что фотоэффект может вызывать рентгеновское излучение [C1]. Дж. Дж. Томсон прославился открытием электрона и исследованиями катодных лучей [T2], но, возможно, самые красивые опыты он провел при исследовании фотоэффекта.

Посмотрим теперь, что же сделали первопроходцы.

1887 г.: Герц. Пять экспериментальных результатов, полученных в течение одного десятилетия, в значительной степени повлияли на развитие физики XX в. Перечислю их в хронологическом порядке: были открыты фотоэлектрический эффект, рентгеновское излучение, радиоактивность, эффект Зеемана и электрон. Первые три открытия были сделаны случайно. Герц обнаружил фотоэффект, заинтересовавшись побочным эффектом, на который он натолкнулся при исследовании электромагнитных свойств света [H3]. Он, в частности, изучал искровые разряды, возникающие между двумя металлическими поверхностями при определенной разности потенциалов. При этом первичная искра, вылетающая из одной поверхности, вызывает появление на другой поверхности вторичной искры. Так как она менее заметна, Герц поставил вокруг второй поверхности затеняющий экран и был очень удивлен тем, что это вызвало укорочение вторичной искры. Он тут же установил, что данный эффект вызывается той частью экрана, которая находится между двумя искрами. Это не был электростатический эффект, поскольку оказалось, что в принципе безразлично, является экран проводником или изолятором. Герц заподозрил, что наблюдаемое явление каким-то образом связано со светом, излучаемым первичной искрой. Серия изящных экспериментов подтвердила его догадку: свет может вызывать появление искр. Так, он увеличивал расстояние между металлически-

ми поверхностями до тех пор, пока искры не пропадали, а затем освещал их дуговой лампой — искры появлялись вновь. Правда, он пришел к не совсем правильному выводу о том, что «...если наблюдаемое явление действительно вызывается светом, то таким светом должен быть ультрафиолет».

1888 г.: Гальвакс. Основываясь на работе Герца, Вильгельм Гальвакс далее показал, что облучение электрически нейтральных металлических тел ультрафиолетовым светом приводит к приобретению ими положительного заряда [H4].

Первые попытки объяснить природу этого явления предпринимались еще до открытия электрона (1897). В 1889 г. выдвигалось предположение о том, что ультрафиолетовое излучение может выбивать с поверхности металла мельчайшие металлические частички [L4].

1899 г.: Дж. Дж. Томсон. Томсон первым установил, что вызываемый ультрафиолетовым излучением фотоэффект есть на самом деле эмиссия электронов [T1]. Он начал исследование фотоэлектричества с измерения значения e/m для частиц, выбиваемых светом, используя тот же метод, которым пользовался два года назад, когда изучал катодные лучи (поток частиц проходил через скрещенные магнитное и электрическое поля). Томсон пришел к следующему выводу: «Отношение e/m в случае ультрафиолетового света... такое же, как для катодных лучей». В 1897 г. ему не удалось по отдельности определить значения m и e для катодных лучей, но теперь он понял, как это сделать применительно к фотоэлектронам. Второй вывод Томсона звучит так: «e имеет то же значение, что и заряд, переносимый атомом водорода при электролизе растворов».

Весьма интересен метод, которым воспользовался Томсон при определении значения e,— он одним из первых применил камеру Вильсона. Студент Томсона Чарлз Томсон Рис Вильсон обнаружил, что заряженные частицы могут быть центрами конденсации при попадании в пересыщенный водяной пар. Томсон применил этот метод к определению числа заряженных частиц, посчитав число капель, а их общий заряд измерил электрометром. С помощью всех этих технических нововведений ему удалось получить для e очень неплохое значение $6{,}8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ ($2{,}3 \times \times 10^{-19}$ Кл).

1902 г.: Ленард. В 1902 г. Филипп Ленард изучал фотоэффект, используя в качестве источника света угольную дуговую лампу. Он мог варьировать интенсивность света в пределах трех порядков. Именно Ленард сделал важнейшее открытие — энергия электрона «ни в малейшей степени не зависит от интенсивности света» [L5]. А как же зависит энергия фотоэлектрона от частоты света? Энергия растет с увеличением частоты; больше в 1905 г. ничего не было известно [S2].

1905 г.: Эйнштейн. На основе своего эвристического принципа Эйнштейн предложил следующее «простейшее объяснение» фотоэффекта: световой квант отдает всю свою энергию одному-един-

ственному электрону вне зависимости от присутствия других световых квантов. Он также указал, что электрон, выбиваемый изнутри тела, будет, вообще говоря, терять часть энергии до того, как достигнет поверхности. Пусть E_{max} — энергия электрона в том случае, когда потеря энергии равна нулю. Тогда, заявляет Эйнштейн, получаем следующее выражение (записанное здесь в современных обозначениях):

$$E_{max} = h\nu - P, \qquad (19.24)$$

где ν — частота падающего (монохроматического) излучения, P — работа выхода, т. е. энергия, необходимая для того, чтобы покинуть поверхность. Эйнштейн указал, что уравнение (19.24) объясняет наблюдения Ленарда о независимости энергии электронов от интенсивности освещения.

Уравнение (19.24) знаменует второе «явление» h. Из него следуют совершенно новые и абсолютно определенные выводы. Во-первых, энергия должна линейно зависеть от ν. Во-вторых, угол наклона графика зависимости E от ν представляет собой универсальную константу, не зависящую от природы облучаемого вещества. В-третьих, значение этого угла должно равняться постоянной h, определяемой из закона излучения Планка. Все эти выводы были в то время новы.

Эйнштейн указал еще ряд приложений своего эвристического принципа: 1) частота света при фотолюминесценции не может превосходить частоту падающего света (правило Стокса) [E5]; 2) при фотоионизации энергия испущенного электрона не может превышать $h\nu$, где ν — частота падающего света [E5][9]; 3) в 1906 г. он рассмотрел обратный фотоэффект (эффект Вольта) [E7]; 4) в 1909 г. он исследовал вопрос об образовании вторичных катодных лучей под воздействием рентгеновского излучения [E10]; 5) в 1911 г. он использовал свой эвристический принцип для определения верхнего предела частоты тормозного излучения [E11].

1915 г.: Милликен; предел Дуэна — Хаита. В 1909 г. вышла в свет вторая обзорная статья по фотоэффекту [L6]. Из нее следует, что в то время велись эксперименты по определению зависимости E_{max} от частоты, но сделать какой-либо окончательный вывод не удавалось. Среди результатов, полученных в последующие несколько лет, особого внимания заслуживают данные Артура Левелина Хьюза, последнего ученика Дж. Дж. Томсона. Он обнаружил, что между E и ν имеется линейная зависимость, а тангенс угла наклона этой прямой колеблется в пределах от $4{,}9 \cdot 10^{-27}$ до $5{,}7 \cdot 10^{-27}$ в зависимости от природы облучаемого вещества [H5]. Данные Хьюза и других исследователей были критически проанализированы в 1913 г.; были также сделаны

[9]) В 1912 г. Эйнштейн [E9] указал, что его эвристический принцип может применяться не только к фотоионизации, но и к фотохимическим процессам.

оговорки технического характера по поводу методик Хьюза [P10]. Однако вскоре Джинс в крупной обзорной статье, посвященной теории излучения [J3], заявил, что «...почти все согласны» со справедливостью уравнения (19.24). Единого мнения еще не было, но, очевидно, экспериментаторы все больше убеждались в верности соотношения Эйнштейна.

Тем временем в лаборатории Чикагского университета этой проблемой уже несколько лет занимался Милликен. Он применял видимый свет (серию линий спектра ртути), а в качестве мишени использовал различные щелочные металлы (светочувствительные при длинах волн до 0,6 мкм). Милликен докладывал о своих результатах на заседаниях Американского физического общества 24 апреля 1914 г. и вновь 24 апреля 1915 г. [M1, M2]. В пространной статье 1916 г. он привел детали своих изящных экспериментов и их результаты: уравнение (19.24) выполняется прекрасно, а «...постоянная Планка была измерена фотоэлектрическим способом с погрешностью около 0,5 %; она имеет значение $h = 6{,}57 \cdot 10^{-27}$ [эрг · с]».

Исследования эффекта Вольты также подтвердили эвристический принцип Эйнштейна. Это подтверждение было получено в 1915 г. в ходе экспериментов с рентгеновским излучением, проводившихся в Гарварде Уильямом Дуэном и его ассистентом Франклином Хантом [D1]. (Дуэн — один из первых американских биофизиков. Его интерес к рентгеновскому излучению был вызван в основном той ролью, которую оно играет в лечении рака.) Работая с рентгеновской трубкой при постоянном потенциале V, они обнаружили, что частота генерируемого рентгеновского излучения имеет четкий верхний предел в точном соответствии с выражением $eV = h\nu$, полученным Эйнштейном в 1906 г. Сейчас эта максимальная частота называется пределом Дуэна — Ханта. Они получили также довольно неплохое значение $h = 6{,}39 \cdot 10^{-27}$ эрг · с $(6{,}39 \cdot 10^{-34}$ Дж · с).

В § 18.1 я уже упоминал о реакции Милликена на работу Эйнштейна о световых квантах. Дуэн и Хант вообще не ссылались в своей работе на Эйнштейна. Ниже мы более подробно рассмотрим, как другие ученые отнеслись к гипотезе световых квантов.

§ 19.6. Отклики на гипотезу световых квантов

Оценка, данная Эйнштейну Планком, Нернстом, Рубенсом и Варбургом в 1913 г., когда они рекомендовали его для избрания в члены Прусской академии наук, задаст верный тон дальнейшему повествованию. Их рекомендация, в которой выражается высочайшая оценка достижений Эйнштейна, завершается словами: «Итак, можно сказать, что вряд ли есть хоть одна крупная проблема в современной физике, в решение которой Эйнштейн не внес бы заметного вклада. То, что иногда в своих рассуждениях он заходит слишком далеко, как, например, в случае его

гипотезы световых квантов, вряд ли следует ставить ему в вину, так как даже в точных науках невозможно предлагать действительно новаторские идеи, не беря на себя определенного риска»\ [K5].

Осмотрительность Эйнштейна. В письмах Эйнштейна — множество материалов, позволяющих судить о его отношении к физике и к людям. Особенно часто в них содержатся его размышления над квантовой теорией вообще и над гипотезой световых квантов в частности. В 1951 г. Эйнштейн писал Бессо: «После 50 лет раздумий я так и не смог приблизиться к ответу на вопрос, что же такое световой квант» [E12].

В представлении Эйнштейна квантовая физика все время переживала кризис. Менялось его отношение к природе этого кризиса, но не к факту его существования. Поэтому Эйнштейн в своих работах подходил к квантовым проблемам с большой осмотрительностью, о чем можно судить хотя бы по названию его мартовской статьи. В первые годы после выдвижения гипотезы световых квантов он с полным основанием мог считать свою гипотезу промежуточным шагом. Эйнштейн четко ее сформулировал только для области $h\nu/kT \gg 1$, т. е. там, где выполняется закон черного излучения по Вину. Кроме того, он использовал этот закон как экспериментальный факт, не дав ему никакого объяснения. Эйнштейну с самого начала было ясно, что между его принципом и волновой картиной электромагнитного излучения существует резкое противоречие, и это противоречие, по его мнению, так и не удалось преодолеть ни тогда, ни позднее. Эйнштейн, человек безусловно честный, не мог не подчеркивать временного характера своей гипотезы. В 1911 г. на первом Сольвеевском конгрессе он недвусмысленно заявил: «Я подчеркиваю временный характер этого вспомогательного представления [о световых квантах], которое, по-видимому, несовместимо с экспериментально проверенными следствиями волновой теории» [E11].

Удивительно, как часто физики готовы были поверить, будто Эйнштейн отрекся от своей гипотезы. Первым, кто решил, что Эйнштейн сдал свои позиции, был его почитатель М. Лауэ. В 1906 г. он писал: «Лично мне любая работа, в которой вероятностные соображения относятся к вакууму, представляется очень сомнительной» [L7]. В конце 1907 г. Лауэ вновь обратился к Эйнштейну: «Очень рад, что Вы отказались от своей теории световых квантов» [L8]. А вот что писал в 1912 г. Зоммерфельд: «Эйнштейн сделал слишком далеко идущие выводы из открытия Планка [т. е. кванта действия] и перенес квантовые свойства излучения и поглощения на структуру энергии света в пространстве, не придерживаясь, как мне кажется, своей первоначальной, чрезвычайно дерзкой точки зрения [1905 г.]» [S3]. Говоря о световых квантах, Милликен утверждал в 1913 г., что Эйнштейн, по его мнению, «отказался от этой идеи года два назад» [M3], а в 1916 г. он писал: «Несмотря на ... полный успех уравнения Эйнштейна [для фотоэффекта], физическая теория, скрывающая-

ся за ним, оказалась столь неприемлемой, что даже сам Эйнштейн, по-моему, ее более не придерживается» [М4].

Мне кажется, сопротивление идее световых квантов было настолько велико, что осмотрительность Эйнштейна почти всеми ошибочно принималась за отсутствие твердой позиции. Однако ни в его письмах, ни в статьях я не нашел никаких указаний на то, что он хоть однажды отказался от утверждений, сделанных им в 1905 г.

Электромагнетизм: свободные поля и взаимодействия. Мартовская статья Эйнштейна — это вторая революционная работа по старой квантовой теории. Первой была, конечно, статья Планка (декабрь 1900 г.) [Р4]. Обе работы содержали представления, противоречащие классическим концепциям, но сопротивление идеям Планка было гораздо менее выраженным и не таким ожесточенным, как сопротивление идеям Эйнштейна. Возникает вопрос: почему?

Прежде чем дать ответ, сделаю несколько общих замечаний о старой квантовой теории. Основным ее результатом были квантовые правила, описывающие стационарные состояния вещества и естественного излучения. В отношении же наиболее трудной из проблем, касающихся электромагнитных явлений,— взаимодействия излучения с веществом — ничего подобного добиться в целом не удалось. Здесь продвижение вперед началось только после появления квантовой теории поля, в которой были введены понятия рождения и аннигиляции частиц. С тех пор успехи в решении проблем взаимодействий позволили добиться огромного прогресса. Но и сегодня в этой области еще далеко не все известно.

Как мы видели в § 19.1, когда Планк ввел понятие квантов для описания спектральных свойств естественного излучения, он применил квантование к веществу, к своим вещественным осцилляторам. Тогда он не представлял себе, что такой подход требует пересмотра классического описания самого поля излучения. При его подходе, вроде бы, только по-иному рассматривалось взаимодействие излучения с веществом. Это выглядело не очень странно, так как проблема взаимодействия все равно была полна неясностей. Что же касается Эйнштейна, то гипотезой световых квантов он осмелился посягнуть на уравнения Максвелла для свободного поля, о которых, как небезосновательно считалось, было известно гораздо больше, чем о взаимодействии излучения с веществом. Поэтому необычная идея Планка гораздо меньше шокировала физиков, чем экстравагантные предположения Эйнштейна.

Столь разное отношение к двум аспектам теории, связанным с именами Планка и Эйнштейна, весьма четко прослеживается в трудах ведущих теоретиков того времени. Сам Планк высказывал серьезные сомнения в отношении гипотезы световых квантов. В 1907 г. он писал Эйнштейну: «Я не доискиваюсь смысла кванта действия [светового кванта] в вакууме, а, скорее, пытаюсь

понять, что происходит в местах поглощения и испускания; я полагаю, что все происходящее в вакууме полностью описывается уравнениями Максвелла» [P11].

На физической конференции в 1909 г. Планк высказал соображение, которое очень ярко иллюстрирует желание его и других ученых «оставить в стороне» поле излучения и искать разрешение квантовых парадоксов в проблемах взаимодействия: «Мне кажется, что следует сначала попытаться перенести все трудности квантовой теории в область взаимодействия излучения с веществом» [P12].

В том же году Лоренц заявил, что верит в «гипотезу элементов энергии Планка», но выразил серьезные сомнения в отношении существования световых квантов «...сохраняющих свою индивидуальность в процессе распространения» [L9].

Итак, к концу первого десятилетия XX в. многие ведущие теоретики были готовы согласиться с тем, что квантовая теория займет свое место в физике. Однако теория свободного поля излучения, созданная Максвеллом, не давала возможности внести в нее какие-либо изменения (так казалось в то время); в ней в отличие от гораздо менее ясного описания взаимодействия излучения с веществом не было темных мест, позволявших скрыть свое незнание. Этим, а также тем, что до 20-х годов больше никаких открытий не было сделано, и объясняется столь сильное сопротивление идеям Эйнштейна.

Влияние эксперимента. Первые три революционные работы по старой квантовой теории были написаны Планком [P4], Эйнштейном [E5] и Бором [B2]. В каждой из них содержались предложения, отвергавшие классические концепции. Тем не менее, сопротивление идеям Планка и Бора (несомненно, имевшее место) было гораздо менее ожесточенным, чем идеям Эйнштейна. Почему? Из-за влияния эксперимента.

Физик (хороший физик) любит обсуждать неподтвержденные гипотезы в частной беседе, но обычно высказывает недовольство, когда это делается публично. Физики — это консервативно настроенные революционеры, которые изо всех интеллектуальных сил сопротивляются нововведениям, но принимают их, если экспериментальные факты неопровержимо свидетельствуют в пользу этих нововведений. Те, кто продолжают упорствовать, обычно остаются в стороне от общего хода развития физики.

Я часто спорил с Эйнштейном о том, насколько можно полагаться на экспериментальные свидетельства при проверке фундаментально новых идей. В гл. 25 я расскажу об этом подробней. А пока посмотрим, какое влияние оказывали эксперименты на отношение к идеям Планка, Бора и Эйнштейна.

Сначала поговорим о Планке. То, что он работал в контакте с учеными из Берлинского физико-технического института, где проводились первоклассные эксперименты по излучению черного тела, несомненно, сыграло огромную роль в его открытии 1900 г. (хотя было бы совершенно неверно утверждать, что это един-

ственный важный фактор). С самого начала результаты этих экспериментов облегчили принятие формулы Планка. Можно и должно было сомневаться в верности ее вывода; такие сомнения в числе прочих высказывал и Эйнштейн в 1905 г. Но в то же время ни Эйнштейн, ни кто-либо другой не могли отрицать того, что в высшей степени нетривиальная универсальная кривая Планка прекрасно соответствовала результатам опытов. Значит, Планку удалось «напасть на след».

Статья Бора об атоме водорода [B2], написанная в апреле 1913 г., была революционной работой; она отнюдь не сразу получила общее признание. Но невозможно было отрицать, что полученное Бором выражение для постоянной Ридберга $2\pi^2e^4m/h^3c$ водорода было удивительно точным (отклонение на 1913 г. составляло 6 %). Когда в 1913 г. Бору удалось дать элементарный вывод соотношения постоянных Ридберга для однократно ионизованного гелия и водорода и полученный теоретически результат совпал с опытными данными с точностью до пятой значащей цифры [B3], стало совершенно очевидно, что представления Бора во многом соответствуют реальности. Узнав о том, что Бор получил соотношение между постоянными Ридберга для гелия и водорода, Эйнштейн сказал: «Это одно из величайших открытий» [H6].

Сам же Эйнштейн мало на что мог сослаться в подтверждение своих идей.

Правда, в статье 1905 г. он указал на ряд экспериментальных следствий гипотезы световых квантов, но в его распоряжении не было опытных кривых, с которыми можно было бы проводить сравнение; не мог он предложить для проверки и конкретных значений. Эйнштейн показал, что при фотоэффекте энергия электрона E есть константа, если частота света ν остается неизменной, и это объясняло результаты Ленарда. Но данные Ленарда были не настолько точны, чтобы помешать Дж. Дж. Томсону и Зоммерфельду предложить другие теории фотоэффекта, в которых закон Ленарда строго не выполнялся [S4]. Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта $E = h\nu - P$ вытекает линейная зависимость между E и ν. Но в то время, когда Эйнштейн предложил эвристический принцип, никто точно не знал, какой вид имеет зависимость E от ν, помимо того, что энергия увеличивается с ростом частоты. В отличие от Бора и Планка Эйнштейну пришлось ждать подтверждения одного из следствий своей гипотезы, а именно линейной зависимости между E и ν, десять лет; об этом шла речь в предыдущем параграфе. Немедленным и положительным результатом этих экспериментальных достижений стало то, что сразу отпали все альтернативные теории фотоэффекта.

Тем не менее, обособленность Эйнштейна не уменьшилась.

Я уже упоминал о том, что Милликен гордился результатами своих исследований фотоэффекта, но все равно утверждал, что теория квантов света «представляется несостоятельной» [M5].

В 1918 г. Резерфорд так отзывался о результатах Дуэна — Ханта: «В настоящий момент нет физического объяснения этой удивительной зависимости энергии от частоты» [R7]. Перечень таких заявлений можно было бы продолжить, но суть не в этом. Важно то, что даже после признания справедливости закона Эйнштейна для фотоэффекта практически никто, кроме него самого, не хотел принимать всерьез световые кванты.

Все так и оставалось до начала 20-х годов, и об этом свидетельствует цитата из официального текста представления Эйнштейна к Нобелевской премии в 1922 г.: «Альберту Эйнштейну за его вклад в теоретическую физику, и в особенности за открытие им закона фотоэлектрического эффекта» [A2]. Эта фраза не только говорит об исторической недооценке роли Эйнштейна, но и точно отражает общее мнение физиков того времени.

Резюмируя, можно сказать, что корни сильнейшего сопротивления гипотезе световых квантов крылись в парадоксах корпускулярно-волнового дуализма. Это сопротивление было обусловлено еще и тем, что представление о световых квантах, казалось, противоречило той части теории электромагнетизма, которая считалась наиболее разработанной,— теории свободного поля. Более того, экспериментальное подтверждение последовало через много лет, но даже после опытной проверки верности описания фотоэффекта идея световых квантов в общем считалась неприемлемой. Постоянные напоминания Эйнштейна о временном характере гипотезы световых квантов еще более подкрепляли негативную позицию остальных физиков.

Сразу же после окончания мартовской статьи Эйнштейн написал докторскую диссертацию. Затем последовали работа о броуновском движении, теория относительности, а далее принцип эквивалентности. Эйнштейн не возвращался к проблеме световых квантов до 1909 г. Тем не менее, в 1906 г. он сделал еще один важный вклад в квантовую физику — создал теорию удельной теплоемкости. О ней и пойдет речь в следующей главе, а к световым квантам мы вернемся в гл. 21.

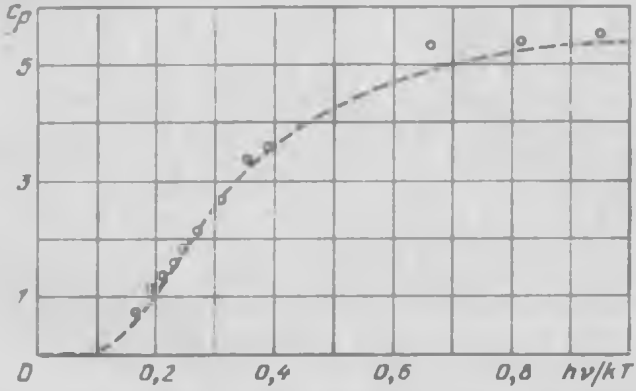
Глава 20. ЭЙНШТЕЙН И УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

> Чем больших успехов добивается квантовая теория, тем бестолковее она выглядит.
>
> *А. Эйнштейн, 1912 г.*

§ 20.1. Теория удельной теплоемкости XIX в.

К концу первого десятилетия XX в. в квантовой теории были сделаны три крупнейших теоретических открытия: установлен закон излучения черного тела, постулировано существование световых квантов и создана квантовая теория удельной теплоемкости твердых тел. Все эти результаты были получены на осно-

ве статистического подхода. Поражает различие интервалов времени между теоретическим предсказанием и экспериментальным подтверждением для каждого из этих открытий. Планк сформулировал свой закон излучения сразу же после того, как узнал о результатах опытов в дальней инфракрасной области, дополнявших ранее имевшиеся данные для более высоких частот. Со световыми квантами дело обстояло по-другому. Прошло много лет, прежде чем гипотеза Эйнштейна была окончательно подтверждена экспериментом. Как мы увидим ниже, в случае удель-



Первый из опубликованных графиков, относящихся к квантовой теории твердого тела. Здесь отложены значения удельной теплоемкости твердого тела $c_p \approx c_v$ кал·(моль/К) в зависимости от $h\nu/kT$ [сравнение производится с полученным Эйнштейном уравнением (20.4)]. Кружки соответствуют измерениям Вебера для алмаза. Наилучшее совпадение между расчетами Эйнштейна и экспериментальными данными Вебера наблюдается при $h\nu/k \approx 1300$ К

ной теплоемкости ситуация была иной. В первой статье Эйнштейна на эту тему [E1], написанной в ноябре 1906 г., качественно верно объяснялась аномалия, о существовании которой было известно с 1840 г. Аномалия заключалась в малом значении удельной теплоемкости алмаза при комнатной температуре. Эйнштейн показал, что это объясняется квантовыми эффектами. В его работе приведен график зависимости удельной теплоемкости алмаза от температуры (воспроизводимый здесь) — первый в истории квантовой теории твердого тела опубликованный график зависимости такого рода. Это также один из трех известных мне случаев, когда Эйнштейн приводил графики для сравнения теории с экспериментом (еще один случай будет упомянут в § 20.2).

Для того чтобы отнести что-либо к аномалии, необходимо иметь теорию, правило или, на худой конец, общепринятое мнение. Как я уже упоминал, особенности в поведении удельной теплоемкости были обнаружены почти за полвека до того, как Эйнштейн дал им объяснение. Задолго до 1906 г. было также известно о гораздо более необычных свойствах удельной тепло-

емкости газов. Почему же именно алмаз считался исключением? Какими свойствами обладали другие вещества? Для того чтобы лучше понять, что сделал Эйнштейн, необходимо вначале вкратце ответить на эти вопросы. Поэтому сначала расскажу о том, что было известно об удельной теплоемкости в XIX в.

Все началось в 1819 г., когда два молодых француза — Пьер Луи Дюлонг и Алекси Терез Пти — после многолетних исследований по термометрии сделали неожиданное открытие. Для десятка металлов и серы (при комнатной температуре) они обнаружили, что c — теплоемкость грамм-атома [1]) вещества (которую здесь называем удельной теплоемкостью) — имеет практически одно и то же значение, примерно равное 6 кал/(моль · К) [P1]. Французские ученые, конечно, поняли, что это не простое совпадение: «Отсюда можно вывести следующий закон: атомы всех простых тел [элементов] имеют в точности одинаковую удельную теплоемкость». Они считали, что это утверждение справедливо не только для элементов в твердом состоянии, и поначалу надеялись, что более совершенные эксперименты позволят показать справедливость данного закона и для газов. Однако в 1830 г. стало ясно, что установленное ими правило в лучшем случае относится к твердым телам.

Тогда, на заре развития химии не было точных данных по атомным весам многих элементов. Дюлонг и Пти в ряде случаев правильно разделили пополам значения атомных весов, найденных ранее другими методами, для того чтобы привести в соответствие полученные ими данные со своим законом [F1]. На протяжении многих лет правило Дюлонга — Пти было важным способом определения атомного веса элементов.

Однако довольно скоро обнаружилось, что даже для твердых тел правило Дюлонга — Пти выполняется, вопреки мнению его открывателей, отнюдь не всегда. Амедео Авогадро одним из первых указал на отклонения от этого правила для углерода, но его измерения не отличались точностью [2]). Положение еще более осложнилось в 1840 г., когда швейцарские физики Огюст де ля Рив и Франсуа Марсе сообщили о своих исследованиях углерода. В частности, они раздобыли «...не без трудностей и расходов» некоторое количество порошка алмаза, достаточное для проведения опытов, и получили для c значение, примерно равное 1,4 кал/(моль · К) [R1]. Почти в то же время алмаз исследовался также Анри Виктором Реньо, который больше чем кто-либо

---

[1]) Следует уточнить, что эти и другие эксперименты с твердыми телами, о которых пойдет речь дальше, позволяли определить c_p при атмосферном давлении. Далее сравниваться будут теоретические значения c_v. Нужно вводить малую поправку, учитывающую разницу между c_p и c_v. В дальнейшем этой поправкой будем пренебрегать [L1].

[2]) В 1833 г. Авогадро получил для углерода при комнатной температуре $c \approx 3$ кал/(моль · К). Это слишком высокое значение. Так как случайно оказалось, что эта цифра вдвое меньше значения Дюлонга — Пти, Авогадро ошибочно предположил, что «следует всегда уменьшать атом [атомную массу] серы и металлов наполовину» [A1].

другой сделал в XIX в. в области экспериментального изучения проблемы удельной теплоемкости. Он получил $c \approx$ $\approx 1{,}8$ кал/(моль·К) [R2] и высказался об углероде совершенно недвусмысленно: «...он является полным исключением среди простых тел, так как не удовлетворяет общему закону, [связывающему] удельную теплоемкость с атомным весом». Реньо продолжал исследовать удельную теплоемкость на протяжении 20 лет и нашел еще ряд отклонений от общего закона, однако не настолько значительных, как в случае алмаза.

В 70-е годы прошлого века Генрих Фридрих Вебер[3]), работавший тогда в Берлине, сделал еще один шаг вперед: он заново проанализировал данные де ля Рива, Марсо и Реньо и пришел к правильному выводу, что различные значения удельной теплоемкости алмаза, полученные этими исследователями, не могут объясняться систематическими погрешностями. Де ля Рив с Марсе приводили усредненное значение для температур от 3 до 14 °С, а Реньо ставил опыты в температурном интервале от 8 до 98 °С; поэтому, как отметил Вебер, результаты обоих экспериментов окажутся верными, если предположить, что удельная теплоемкость углерода меняется с температурой [W1]! Незначительные изменения удельной теплоемкости при изменении температуры для некоторых веществ (например, воды) были известны давно [N1]. Однако Вебер высказал предположение о сильной зависимости удельной теплоемкости от температуры, что было новой и смелой идеей. Он провел измерения при 12 различных значениях температуры в интервале от 0 до 200 °С, позволившие подтвердить его предположение: для алмаза значение c в указанном интервале изменялось более чем в три раза. Вебер хотел продолжить опыты, но наступил март и, увы, негде было взять снега для калориметра. Он заявил, что продолжит измерения «... как только позволят метеорологические условия». В следующий раз Вебер опубликовал результаты в 1875 г.; он привел тогда данные своих прекрасных измерений удельной теплоемкости бора, кремния, графита и алмаза в интервале температур от −100 до 1000 °С [W2]. Для алмаза в этом температурном диапазоне значение c изменялось более чем в 15 раз.

К 1872 г. Вебер сделал предположение (которое он же и подтвердил в 1875 г.), что при высоких температурах удельная теплоемкость приближается к значению Дюлонга — Пти. По словам Вебера: «Три любопытных исключения [углерод, бор, кремний] из закона Дюлонга — Пти, вызывавшие такую тревогу, отныне устранены: закон Дюлонга — Пти для удельной теплоемкости твердых элементов стал теперь строгим законом, не имеющим исключений» [W2]. Этот, конечно, неверный вывод все же был значительным шагом вперед. Кружки на приведенном выше

---

[3]) Вебер, с которым мы встречались в гл. 3, был преподавателем Эйнштейна. Сохранились конспекты лекций Вебера, записанные Эйнштейном. В них нет свидетельств того, что в студенческие годы Эйнштейн знал о полученных Вебером результатах.

графике соответствуют результатам экспериментов Вебера 1875 г.[4])

В 1872 г. еще один физик помимо Вебера предположил, что удельная теплоемкость углерода может достигать значения Дюлонга — Пти при высоких температурах; это был Джеймс Дьюар. Он шел к проблеме удельной теплоемкости углерода совсем другим путем. Пытаясь определить температуру Солнца, Дьюар заинтересовался точкой кипения углерода и начал проводить высокотемпературные эксперименты, из которых заключил [D1], что средняя удельная теплоемкость углерода в интервале температур от 0 до 2000 °С примерно равна 5 кал/(моль · К) и что «...истинная удельная теплоемкость [на 1 г] при 2000 °С должна составлять минимум 0,5, чтобы при данной температуре значение для углерода согласовалось с законом Дюлонга — Пти»[5]).

Наибольших успехов в рассматриваемой области Дьюар добился в диапазоне сверхнизких температур. В 1898 г. он получил жидкий водород, а в 1905 г. сообщил о результатах измерений удельной теплоемкости в новом диапазоне температур. Неудивительно, что в числе первых веществ, которые он исследовал, оказался алмаз. Для него Дьюар обнаружил в интервале температур от 20 до 85 К очень низкое среднее значение $c \approx$ $\approx 0{,}05$ кал/(моль · К). «Открываются практически неограниченные возможности для исследований удельной теплоемкости»,— заметил в своей работе Дьюар [D2]. Эта работа включена в подробный перечень литературы, посвященной удельной теплоемкости твердых элементов, который был составлен Альфредом Виганом [W3]. Обзор Виганда был помещен в том же выпуске журнала «Annalen der Physik», в котором содержалась первая работа Эйнштейна о квантовой теории удельной теплоемкости. Итак, мы познакомились с тем, что было сделано в области эксперимента до выхода в свет статьи Эйнштейна.

Теоретическое объяснение правила Дюлонга — Пти было дано Больцманом. Он безуспешно пытался решить эту проблему еще в 1866 г. [B2]. Ему потребовалось десять лет, чтобы понять: это правило можно истолковать с помощью теоремы равнораспределения классической статистической механики. В простейшем виде эта теорема была известна с 1860 г.: средняя кинетическая энергия, приходящая на каждую степень свободы, равна $kT/2$[6]). В 1871 г. Больцман показал, что средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной энергии системы частиц, каждая

---

[4]) К концу XIX в. стало ясно, что уменьшение удельной теплоемкости в зависимости от температуры наблюдается гораздо чаще, чем считали ранее, т. е. не только для углерода, бора и кремния [B1].

[5]) Это привело к спору о приоритете между Вебером и Дьюаром, весьма безобидному по меркам XIX в. Как бы то ни было, бесспорно, что окончательно сомнения исчезли только после выполнения Вебером точных измерений в 1875 г.

[6]) Этот результат (хотя и несколько иначе сформулированный) был получен Джоном Джеймсом Уотерстоном и Макевеллом [M1]. О любопытной роли Уотерстона можно прочитать в [B3].

из которых испытывает колебания под воздействием внешних гармонических сил [B4]. В 1876 г. он применил этот результат к трехмерной решетке [B5] и установил, что средняя энергия равна $3RT \approx 6$ кал/моль. Следовательно, c_v — удельная теплоемкость при постоянном объеме — равна 6 кал/(моль·К). Итак, спустя полвека значение Дюлонга — Пти получило теоретическое обоснование! По словам Больцмана, его результат хорошо согласовывался с экспериментом «...для всех простых твердых тел, за исключением углерода, бора[7]) и кремния». Больцман, кроме того, предположил, что указанные аномалии могут быть следствием потери степеней свободы, вызванной «прилипанием друг к другу» соседних атомов кристаллической решетки при низких температурах. Это предположение было развито другими учеными [R3] и упоминается в обзоре Виганда 1906 г. как наилучшее объяснение аномалий. Я рассказываю об этих неверных предположениях исключительно для того, чтобы подчеркнуть один важный факт: до выхода в 1906 г. в свет статьи Эйнштейна никто не догадывался, что аномальное поведение алмаза следует понимать как результат несправедливости (вернее, неприменимости) классической теоремы равнораспределения. Первым об этом прямо заявил Эйнштейн.

В то время было хорошо известно, что в отличие от твердых тел теорема равнораспределения наталкивается на трудности при определении удельной теплоемкости газов. Это вызывало большое беспокойство у крупных ученых XIX в. Хотя данная проблема и не имеет прямого отношения к работе Эйнштейна 1906 г., мне представляется полезным дополнить описание положения дел в физике прошлого века краткими замечаниями о том, почему газы вызывали столько трудностей.

Причины затруднений четко определил Максвелл в лекции, прочитанной им в 1875 г.: «Спектроскоп показывает, что некоторые молекулы могут испытывать колебания самых разных видов. Поэтому они должны представлять собой системы очень высокой степени сложности и иметь гораздо больше шести переменных [это число степеней свободы твердого тела]... Каждая дополнительная переменная повышает удельную теплоемкость... Каждая дополнительная степень сложности, приписываемая молекуле, еще более затрудняет согласование расчетных данных с экспериментальными результатами измерений удельной теплоемкости. Это я считаю наибольшей из трудностей, с которыми мы сталкиваемся в молекулярной теории» [M1, т. 2, с. 418].

Максвелла ставила в тупик загадка отсутствующих колебаний. Пояснить, что его беспокоило, можно с помощью следующего упрощенного рассуждения. Рассмотрим молекулу, состоящую из n не имеющих структуры атомов. Она имеет $3n$ степеней свободы, из них три приходится на поступательное движение, максимум три — на вращательное, а все остальные — на

[7]) Уважаемый профессор написал «бром», но имел в виду бор.

колебательное. Кинетическая энергия, соответствующая каждой степени свободы, вносит в значение удельной теплоемкости c_v вклад, равный $kT/2$. Кроме того, свой вклад вносит и потенциальная энергия. Максвелл имел в виду, что это практически всегда будет приводить к слишком большому значению удельной теплоемкости. После выступления Максвелла ученые сконцентрировали внимание на одноатомных газах, и в 1876 г. теорема равнораспределения получила важное подтверждение: было обнаружено, что отношение c_p/c_v для паров ртути равно примерно 5/3 в соответствии с соотношением $c_v = 3R/2$ и правилом для идеального газа $c_p - c_v = R$ [K1]. Со времен Реньо[6]) было известно, что для некоторых двухатомных молекул (включая водород) значение c_v близко к $5R/2$. Максвелл тогда еще не заметил, что как раз такое значение должно следовать из теоремы равнораспределения для молекулы типа «гантель»; впервые на это указал Больцман [B5]. Таким образом, теорема равнораспределения в целом была очень полезной, хотя проблема удельной теплоемкости газов оставалась весьма запутанной.

Потом дела пошли еще хуже. К 1900 г. стало известно о том, что в некоторых случаях c_v зависит (хотя и слабо) от температуры [W4], а это явно противоречило классическим представлениям. Неудивительно, что эти результаты тревожили Больцмана, так как его объяснение аномалий удельной теплоемкости твердых тел никак не годилось для газов. Молекулы разреженных газов вряд ли могут прилипать друг к другу! В 1895 г. он предложил выход из положения: теорема равнораспределения справедлива для газов, но неприменима к системе газ — эфир, поскольку она не находится в тепловом равновесии. «У эфира в целом недостаточно времени, чтобы достичь теплового равновесия с молекулами газа, и он ни в коем случае не достигает того состояния, которое он имел бы, если бы был заключен в один сосуд с молекулами газа на бесконечно долгое время» [B6].

Кельвин занял другую позицию — считал, что неверна классическая теорема равнораспределения. Он продолжал придерживаться этого мнения несмотря на то, что все его попытки найти изъяны в теоретическом выводе, естественно, закончились неудачей. «Вряд ли можно испытывать удовлетворение, когда математический вывод не доказан, а экспериментальный результат не соответствует доктрине Больцмана — Максвелла»,— сказал Кельвин в 1900 г., выступая перед Королевским обществом [K2, разд. 27]. Подводя итог своим представлениям, он заявил, что «...самым простым способом преодоления трудностей является отказ от этой доктрины» [K2, с. xvii].

Рэлей придерживался такого мнения: доказательство теоремы равнораспределения верно, и в то же время *существует* тепловое равновесие между молекулами газа и эфиром; таким образом,

---

[6]) Подробный обзор исследований удельной теплоемкости газов со времен Лавуазье до 1896 г. приведен в учебнике [W4].

налицо кризис. «По-видимому, требуется отойти от разрушительной простоты общего вывода [вытекающего из закона равнораспределения]» [R4].

Таково было положение дел, когда Эйнштейн занялся проблемой удельной теплоемкости.

§ 20.2. Эйнштейн

До 1906 г. кванты Планка применялись в довольно узкой области излучения черного тела. Работа Эйнштейна об удельной теплоемкости [E1] важна прежде всего тем, что в ней впервые было ясно показано: квантовые представления имеют гораздо более широкую сферу применения, чем считалось ранее. Эта статья необычна тем, что в ней Эйнштейн смело использует заведомо приближенную модель для того, чтобы сделать принципиальный вывод; в остальном она похожа на все его новаторские работы лаконичностью и непосредственным рассмотрением сути вопроса.

В начале 1906 г. Эйнштейн решил применить соотношение Планка [уравнение (19.11)], связывающее ρ и равновесную энергию U, в качестве нового физического предположения (§ 19.4). В § 19.1 говорилось, что Планк получил выражение

$$U(\nu, T) = \xi kT/(\exp\xi - 1), \qquad \xi = h\nu/kT, \tag{20.1}$$

изменив метод подсчета состояний, предложенный Больцманом. В статье Эйнштейна об удельной теплоемкости предложен иной метод, который приводит к тому же результату. Там выражение для U записано так[9]):

$$U(\nu, T) = \frac{\int E \exp(-E/kT)\,\omega(E, \nu)\,dE}{\int \exp(-E/kT)\,\omega(E, \nu)\,dE}. \tag{20.2}$$

Экспоненциальный множитель соответствует статистической вероятности для энергии E. Весовой множитель ω содержит информацию динамического характера о плотности состояний в интервале энергий от E до $E + dE$. Для рассматриваемого случая (линейных осцилляторов) ω в классической теории имеет тривиальное значение $\omega(E, \nu) = 1$. Отсюда непосредственно следует результат для закона равнораспределения: $U = kT$. Эйнштейн предложил новую форму для ω. Пусть $\varepsilon = h\nu$. Тогда значение ω будет отлично от нуля только при $n\varepsilon < E < n\varepsilon + \alpha$, $n = 0, 1, 2, \ldots$, «где α — величина, бесконечно малая по сравнению с ε», в результате чего

$$\int_{n\varepsilon}^{n\varepsilon+\alpha} \omega dE = A \tag{20.3}$$

[9]) Я не всюду следую обозначениям оригинальной статьи.

для всех n, а значение константы A несущественно. С математической точки зрения это выражение — предшественник δ-функции! Сегодня мы пишем так: $\omega(E, \nu) = \sum_n \delta(E - nh\nu)$.

Из уравнений (20.2) и (20.3) получаем (20.1). Этот новый подход важен тем, что в нем впервые четко отделены друг от друга статистический и динамический аспекты проблемы. Как позднее заметил Зоммерфельд: «Степени свободы следует не подсчитывать, а взвешивать» [S1].

Комментируя свой новый вывод уравнения (20.1), Эйнштейн отметил: «Однако я думаю, что мы не можем довольствоваться этим результатом» [E1]. Если нужно видоизменить теорию периодически колеблющихся образований, чтобы учесть свойства излучения, то не следует ли, задумался Эйнштейн, поступить аналогичным образом при рассмотрении других проблем молекулярной теории теплоты? «Ответ, по-моему, сомнений не вызывает. Если теория излучения Планка содержит в себе зерно истины, то мы должны ожидать, что и в других областях теории теплоты найдутся противоречия между современной [т. е. классической] молекулярно-кинетической теорией теплоты и опытом, устраняемые предложенным путем. По моему мнению, это действительно имеет место...»

Далее Эйнштейн перешел к рассмотрению проблемы удельной теплоемкости твердых тел и ввел следующую модель трехмерной кристаллической решетки. Атомы узлов решетки испытывают независимые гармонические колебания с одинаковой частотой ν относительно положений равновесия (как отметил Эйнштейн, надо пренебречь изменением объема из-за нагревания, а также вкладом в удельную теплоемкость, который вносят движущиеся в атомах электроны). Он подчеркнул, что из-за вводимых упрощений нельзя ожидать получения абсолютно точных результатов.

Первое обобщение. Эйнштейн применил уравнение (20.2) к своим трехмерным осцилляторам. При тепловом равновесии полная энергия грамм-атома осцилляторов равна $3NU(\nu, T)$, где U задается уравнением (20.1), N — постоянная Авогадро. Отсюда

$$c_v = 3R\xi^2 \exp\xi/(\exp\xi - 1)^2. \qquad (20.4)$$

Это и есть формула Эйнштейна для удельной теплоемкости.

Второе обобщение. По причинам, которые мы здесь не будем анализировать, Эйнштейн вначале считал, что колебания в узлах решетки испытывают электрически заряженные ионы. Через несколько месяцев он опубликовал поправку к своей статье, где указал, что такое предположение излишне [E2] (в случае, рассмотренном Планком, линейные осцилляторы, естественно, должны быть заряженными частицами!). Поправка Эйнштейна сняла с квантовых правил (можно сказать, между прочим) конкретную зависимость от электромагнетизма.

Прежде всего, формула Эйнштейна при высоких температурах приводит к правилу Дюлонга — Пти. Кроме того, это первая формула, описывающая удельную теплоемкость, которая имеет следующее свойство:

$$c_v(T) \to 0 \quad \text{при} \quad T \to 0. \tag{20.5}$$

Как будет показано в следующем параграфе, уравнение (20.5) сыграло важную роль в окончательной формулировке теоремы Нернста.

В формулу Эйнштейна для удельной теплоемкости входит только один параметр. Единственное, что можно варьировать,— это частоту [10]) ν, или, что то же самое, «температуру Эйнштейна» T_E, т. е. значение T, при котором $\xi = 1$. Как уже упоминалось, Эйнштейн сравнил результаты расчетов по своей формуле с данными Вебера для алмаза. При этом сопоставление проводилось для $T_E \approx 1300$ К, при которой «...точки действительно лежат почти на кривой». Столь высокое значение T_E объясняет, почему такие легкие и твердые вещества, как алмаз, проявляют квантовые эффекты при комнатной температуре (укажем для сравнения, что свинец имеет температуру $T_E \approx 70$ К).

По словам Эйнштейна, он воспользовался данными Вебера, приведенными в таблицах Ландольта и Бернштейна. Видимо, он пользовался изданием 1905 г. [L2], которое могло быть в патентном бюро. В этих таблицах еще не было упоминавшихся выше результатов, полученных Дьюаром в 1905 г. По всей вероятности, Эйнштейн не знал о них и в 1906 г. (хотя в том же году они были замечены немецкими физиками [W3]). Может быть, это было и к лучшему. Полученное Дьюаром для алмаза значение $c_v \approx 0{,}05$ кал/(моль · К) есть среднее значение в интервале ξ от 0,02 до 0,07. Оно слишком велико и не согласуется с предложенным Эйнштейном уравнением (20.4) и с данными Вебера: экспоненциальное уменьшение c_v при $T \to 0$ по уравнению (20.4) происходит слишком быстро.

Эйнштейн узнал об этом расхождении в 1911 г., когда гораздо более точные измерения Нернста продемонстрировали, что справедливость уравнения (20.4) нарушается при низких температурах [N2].

Нернст правильно объяснил такое расхождение несправедливостью предположения о том, что колебания узлов решетки являются монохроматическими. Эйнштейн пытался изменить свое первоначальное предположение [E4], но первым правильную зависимость c_v от T при низких температурах получил Петер Дебай: для неметаллических веществ c_v стремится к нулю пропорционально T^3 [D3]. Эйнштейн перестал активно заниматься проблемой удельной теплоемкости в то время, когда вышла работа Дебая, а Макс Борн и Теодор фон Карман более строго описали

---

[10]) В более поздней работе Эйнштейн попытался увязать эту частоту со сжимаемостью вещества [E3].

колебания решетки [B7]. Здесь мы на этом останавливаться не будем.

Однако в 1913 г. Эйнштейн еще раз вернулся к вопросам удельной теплоемкости, на этот раз для газов. Этот возврат был вызван крупными экспериментальными достижениями, начало которым положило открытие Арнольда Эйкена, сделанное в 1912 г. Давно было известно, что для молекулярного водорода при комнатной температуре $c_v \approx 5$ кал/(моль·К). Эйкен показал, что это значение уменьшается по мере снижения температуры, так что $c_v \approx 3$ кал/(моль·К) при $T \approx 60$ К [E5]. Как хорошо известно, это явление вызывается вымораживанием двух вращательных степеней свободы молекулы водорода при низких температурах. В 1913 г. Эйнштейн правильно предположил, что данный эффект связан с вращательными степенями свободы, и попытался дать его количественную теорию. В статье, посвященной этому вопросу, приведен еще один график, служащий сравнению теории с экспериментом [E6]. В этот раз, однако, Эйнштейн ошибся. Его теория базировалась на неверном предположении, в соответствии с которым вращательные степени свободы имеют нулевой уровень энергии [11]).

В 1925 г. Эйнштейн в последний раз обратился к проблеме газов при низких температурах; об этом пойдет речь в § 23.2.

§ 20.3. Нернст: первый Сольвеевский конгресс [12])

«При стремлении температуры к абсолютному нулю энтропия любой системы стремится к универсальной константе, значение которой не зависит от химического или физического состава или от каких-либо других параметров, от которых может зависеть энтропия. Значение этой константы можно принять равным нулю». Из этой современной общей формулировки третьего закона термодинамики следует (за немногими исключениями), что удельная теплоемкость стремится к нулю при $T \to 0$ [H2]. Самый простой первоначальный вариант «тепловой теоремы»[13]) был предложен в 1905 г., до написания Эйнштейном первой работы по удельной теплоемкости. В окончательном виде третий закон был сформулирован и принят после десятилетий сомнений и борьбы [14]). Для целей нашего повествования важно рассмотреть влияние, которое оказала работа Эйнштейна на дальнейший ход событий.

---

[11]) В 1920 г. Эйнштейн объявил, что в ближайшее время опубликует работу о моменте инерции молекулярного водорода [E7]. Однако эта работа так и не была опубликована.

[12]) При подготовке этого параграфа я широко пользовался статьей Клейна [K3] и книгой Германа [H1].

[13]) Так ее называл Нернст.— *Примеч. пер.*

[14]) Прекрасный исторический анализ событий того времени дан Саймоном [S2].

Двадцать третьего декабря 1905 г. Герман Вальтер Нернст выступил перед Геттингенской академией с докладом «Расчет химического равновесия на основе тепловых измерений». В этой работе он предложил новую гипотезу теплового поведения жидкостей и твердых тел при абсолютном нуле [N3]. Для нас эта гипотеза 1905 г. особенно интересна тем, что она относится к химически однородным веществам. В данном случае из гипотезы следует, что различие в значениях энтропии для двух модификаций одного и того же вещества (например, графита и алмаза) стремится к нулю при $T \to 0$. Таким образом, не исключается возможность отличной от нуля теплоемкости при абсолютном нуле, и, действительно, в 1906 г. Нернст предположил, что теплоемкость всех тел стремится к значению 1,5 кал/К при $T = 0$ [N3, N4]. Однако он отметил, что из-за недостатка данных для низких температур доказать это утверждение невозможно. Нернст подчеркнул, что получение таких данных есть «насрочнейшая задача» [N3]. Энергия этого ученого вполне соответствовала его целеустремленности. Нернст вместе с сотрудниками приступил к выполнению обширной программы измерения теплоемкости при низких температурах. Программа охватывала тот же диапазон температур, который уже исследовал Дьюар, но точность измерений была гораздо выше и, кроме того, исследовалось большее число веществ. Естественно, что среди них был и алмаз.

Нернст опубликовал свои первые результаты в 1910 г. [N5]: «...создается четкое впечатление, что удельная теплоемкость становится равной нулю или, по крайней мере, принимает очень малые значения при очень низких температурах. Это качественно согласуется с теорией, разработанной г-ном Эйнштейном...».

Итак, порядок событий был следующим. В конце 1905 г. Нернст дал упрощенную формулировку третьего закона. В 1906 г. Эйнштейн впервые предложил теорию, из которой следует, что $c_v \to 0$ при $T \to 0$ для твердых тел. В 1910 г. Нернст указал на соответствие результатов Эйнштейна предложенной им «тепловой теореме». Однако не кто иной, как Планк позднее, в конце 1910 г., сделал шаг, который «не только по форме, но и по сути позволяет пойти несколько дальше, чем [формулировка, предложенная] Нернстом». По Планку удельная теплоемкость как твердых тел, так и жидкостей стремится к нулю при $T \to 0$ [P2]. Следует подчеркнуть, что ни Нернст, ни Планк не дали доказательства третьего закона. Не совсем понятно было, какой статус имеет этот закон; об этом говорил Эйнштейн в 1914 г.: «Вывести теоретически теорему Нернста *термодинамическим* путем, используя опытный факт исчезновения теплоемкости при $T = 0$, пока не удавалось» [E8]. Эйнштейн тут же вполне справедливо указал, что для правильного понимания этой теоремы необходимо привлечь квантовую теорию. В написанном чуть раньше письме Эренфесту Эйнштейн резко критиковал подход Нернста и Планка [E9].

Ссылка на Эйнштейна в работе Нернста 1910 г.— первый случай, когда он признал в своей публикации значение квантовой теории. Однако возникший у него интерес к этой теории был чисто прагматическим. В одной из лекций (по поводу дня рождения императора) Нернст сказал: «Сейчас квантовая теория — это по сути лишь правила выполнения расчетов, и можно сказать, что эти правила выглядят чрезвычайно странно, даже гротескно. Однако примененная Планком и Эйнштейном эта теория принесла столь богатые плоды, что стала очевидной необходимость занять по отношению к ней определенную позицию и подвергнуть ее экспериментальной проверке» [N6]. Далее он сравнил Планка с Дальтоном и Ньютоном. В 1911 г. Нернст попытался видоизменить полученное Эйнштейном уравнение (20.4) [N7].

Нернст был разносторонней личностью, одаренным ученым, человеком с практической сметкой, он умел стимулирующе влиять на своих студентов, был хорошим организатором. Многие не любили его, но он вызывал уважение, «пока не затрагивалась его эгоистическая слабость» [E10]. Нернст почувствовал необходимость проведения конгресса с участием наиболее крупных ученых для обсуждения квантовых проблем. Его разнообразные таланты, а также деловые связи позволили осуществить задуманный план. Нернст нашел промышленника Эрнеста Сольвея, который согласился финансировать конгресс. В подготовке научной программы принимали участие Планк и Лоренц. Первый Сольвеевский конгресс открылся 30 октября 1911 г. Эйнштейну была оказана честь выступить с заключительным докладом. Доклад был озаглавлен «К современному состоянию проблемы удельной теплоемкости»[15]). Эйнштейн дал прекрасный обзор данной проблемы и воспользовался случаем для того, чтобы высказать свое мнение о квантовой теории электромагнитного излучения. Несомненно, в этой области его вклад был гораздо более значительным, чем в решение проблемы удельной теплоемкости, однако работы по квантовой теории твердого тела оказали непосредственное влияние на физику, вследствие чего гораздо больше ученых стали воспринимать квантовую теорию всерьез.

В течение всего периода, о котором шла речь выше, третий закон применялся только к твердым телам и жидкостям. Лишь в 1914 г. Нернст рискнул распространить свою теорему на газы. Основным стимулом этого смелого шага стали измерения удельной теплоемкости молекулярного водорода, выполненные Эйкеном [N8]. Нернст не смог построить убедительную теоретическую модель газа, которая обладала бы свойством $c_v \to 0$ при $T \to 0$, как он сделал это для твердых тел. Положение не менялось до 1925 г., когда была предложена первая модель такого рода. Ее автором был Эйнштейн (§ 23.2).

Эйнштейн, конечно, понимал, что его работы по удельной теплоемкости твердых тел были шагом в правильном направле-

[15]) Перевод на русский язык см. в т. 3, с. 277.— *Примеч. пер.*

нии. Возможно, это его радовало, но в то же время, несомненно, озадачивало. Вот что он писал одному из друзей в 1912 г. по поводу своих работ об удельной теплоемкости газов при низких температурах: «На днях я сформулировал теорию, посвященную этому вопросу. Теория — это слишком претенциозно сказано, так как на самом деле это — нащупывание пути без верной основы. Чем больших успехов добивается квантовая теория, тем бестолковее она выглядит. Как бы потешались люди, далекие от физики, если бы они знали о таком положении дел» [E11].

Глава 21. ФОТОН

§ 21.1. Слияние частиц с волнами и судьба Эйнштейна

Итак, вернемся к рассказу о световых квантах. О них Эйнштейн впервые писал в 1905 г., потом — в 1906 г. Вскоре после опубликования этих двух статей наступил период, который я назвал «три с половиной года молчания». В течение этого времени Эйнштейн непрестанно размышлял над проблемами излучения, о чем свидетельствует письмо Лаубу: «Я постоянно занят вопросом излучения... Проблема квантов невероятно важна и сложна, ей должны заниматься все» [E1]. Темой нашего дальнейшего обсуждения послужат две выдающиеся работы Эйнштейна по теории излучения, опубликованные в 1909 г. Первую из них [E2] он закончил, когда еще был экспертом второго класса в патентном бюро. Вторая работа [E3] была представлена на конференцию, проходившую в Зальцбурге в сентябре 1909 г., вскоре после того, как Эйнштейн был назначен экстраординарным профессором в Цюрихе. Эти статьи известны гораздо меньше чем они того заслуживают, поскольку в них в отличие от первой статьи о световых квантах (фотоэффекте) и работы об удельной теплоемкости рассмотрение фундаментальных проблем не сопровождается какими-либо новыми выводами или предсказаниями, которые можно проверить экспериментально.

В 1909 г. теореме Кирхгофа исполнилось 50 лет. К тому времени Планк уже открыл закон излучения черного тела и некоторые ученые поняли важность этого открытия, хотя закон Планка так и не был доказан. Тем не менее, как сказал Эйнштейн в своем выступлении в Зальцбурге: «...нечего и думать о том, чтобы отвергать теорию Планка...». До Эйнштейна никто не заявлял ничего подобного с такой уверенностью. Из следующей фразы ясно, чем вызвана такая убежденность: Гейгер и Резерфорд опубликовали данные своих измерений электрического заряда, которые «блестяще подтвердились» расчетами Планка (§ 19.1).

В § 4.3 я показал, как Эйнштейн вывел формулу флуктуаций энергии

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = kT^2 \partial \langle E \rangle / \partial T, \qquad (21.1)$$

где $\langle \varepsilon^2 \rangle$ — среднее квадратическое значение флуктуаций энергии, $\langle E \rangle$ — средняя энергия системы, находящейся в контакте с тепловой баней при температуре T. Характерно, что Эйнштейн привел вывод этого уравнения статистической физики в январской статье 1909 г., посвященной квантовой теории. Он хотел применить полученный результат к определению флуктуаций энергии излучения черного тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$. Чтобы понять, как это делается, рассмотрим небольшую часть объема полости, заполненной тепловым излучением; обозначим эту часть объема v. Ограничим v со всех сторон стенкой, задерживающей излучение всех частот, кроме частот интервала $d\nu$. Тогда можно воспользоваться уравнением (21.1), заменив $\langle E \rangle$ величиной $\rho v d\nu$, в результате чего $\langle \varepsilon^2 \rangle$ станет функцией от ν и T:

$$\langle \varepsilon^2(\nu, T) \rangle = kT^2 v d\nu (\partial\rho/\partial T). \qquad (21.2)$$

Данное уравнение описывает флуктуации энергии через спектральную функцию ρ независимо от конкретного вида ρ. Рассмотрим следующие три случая.

1. Функция ρ задается законом Рэлея — Эйнштейна — Джинса [см. (19.17)]. Тогда

$$\langle \varepsilon^2(\nu, T) \rangle = (c^3/8\pi\nu^2)\rho^2 v\, d\nu. \qquad (21.3)$$

2. Функция ρ задается законом Вина [см. (19.7)]. Тогда

$$\langle \varepsilon^2(\nu, T) \rangle = h\nu\rho v\, d\nu. \qquad (21.4)$$

3. Функция ρ задается законом Планка [см. (19.6)]. Тогда

$$\langle \varepsilon^2(\nu, T) \rangle = [h\nu\rho + (c^3/8\pi\nu^2)\rho^2]\, v\, d\nu. \qquad (21.5)$$

(Нет необходимости пояснять, что, хотя я воспользовался во всех трех уравнениях [1]) одним и тем же символом ρ, в каждом случае ρ есть различные функции ν и T.)

При обсуждении уравнения (21.5) Эйнштейн подчеркнул, что «...современная теория излучения несовместима с этим результатом». Под современной теорией он, естественно, имел в виду классическую волновую теорию света. Действительно, из классической теории может следовать только второй член уравнения (21.5), «волновой член» [ср. (21.5) и (21.3)]. О первом члене уравнения (21.5) Эйнштейн сказал следующее: «...если бы он был единственным, [то давал бы] такие флуктуации энергии излучения, как будто излучение состоит из движущихся независимо точечных квантов с энергией $h\nu$». Другими словами, сравним уравнения (21.4) и (21.5). Первое соответствует закону Вина, который в свою очередь справедлив в том режиме, для которого Эйнштейн ввел постулат световых квантов.

Отметим новый элемент в последнем утверждении Эйнштейна. Он использовал слово «точечный». Хотя Эйнштейн и не употребил термин «частица» ни в одной из статей 1909 г., он, несом-

[1]) Уравнения (21.3) и (21.4) не приведены в работе Эйнштейна в явном виде.

ненно, рассматривал кванты именно как частицы. Говоря о корпускулярной природе света, он упоминал о «точке зрения теории истечения Ньютона». То, что Эйнштейн представлял себе световые кванты в виде частиц, отчетливо видно из его письма Зоммерфельду, датированного также 1909 г., где он пишет о «группировании энергии света вокруг дискретных точек, движущихся со скоростью света» [E4].

Из уравнения (21.5), грубо говоря, следует, что в излучении присутствуют одновременно корпускулярный и волновой аспекты. Это, в частности, позволило Эйнштейну таким образом резюмировать свое отношение к теории излучения[2]): «То, что наши теперешние основы теории излучения должны быть отброшены, я уже пытался показать ранее... Я считаю, что следующая фаза развития теоретической физики даст нам теорию света, которая будет в каком-то смысле слиянием волновой теории света с теорией истечения... Нельзя считать несовместимыми обе структуры (волновую и квантовую)... Тот факт, что речь идет лишь о *модификации* наших современных теорий, а не о полном *отказе* от них, вытекает из того, что закон Джинса в пределе (для малых ν/T), видимо, выполняется [уравнение (19.17)]».

Упомянутое слияние сейчас называют дополнительностью. Ссылку на закон Джинса сегодня мы назвали бы применением принципа соответствия.

Вряд ли нужно говорить о том, какое огромное значение для развития физики XX в. имело это высказывание Эйнштейна. Мне также кажется, что эта позиция повлияла и на судьбу самого Эйнштейна, если не как личности, то во всяком случае как ученого. В 1909 г. в возрасте 30 лет он был готов принять теорию слияния. Его никто не поддержал: Планк определенно не разделял его точку зрения; Бору еще предстояло выйти на сцену. Но когда такая теория в виде квантовой механики была создана в 1925 г., Эйнштейн отказался признать в качестве фундаментального и бесспорного факта присущий этой теории корпускулярно-волновой дуализм. Может быть, его тревожило то, что одно из высказанных им в 1909 г. утверждений нуждалось в пересмотре: ведь световые кванты с энергией $h\nu$ не являются точечными. Позднее я расскажу о том, как обособленность ученого, опередившего свое время, привела к обособленности Эйнштейна как человека. Я уже упоминал ранее, что происшедшую с Эйнштейном перемену вряд ли можно объяснить только его научной философией.

В качестве послесловия к этому параграфу сделаю несколько кратких замечаний по поводу формулы флуктуаций энергии, предложенной Эйнштейном. Уравнения (21.3)—(21.5) были получены на основе статистического подхода, но должна также существовать возможность вывести их непосредственно из динами-

[2]) В приводимой ниже цитате я объединяю высказывания, взятые из январской и октябрьской статей Эйнштейна 1909 г.

ки. Сам Эйнштейн качественно рассмотрел такой подход к выводу уравнения (21.3). Он указал, что флуктуации вызываются интерференцией волн с частотами, находящимися как в интервале $d\nu$, так и вне этого интервала. Через несколько лет детальный вывод дал Лоренц, который получил уравнение (21.3) из классической теории электромагнетизма [L1]. Однако при попытках вывести из динамики аналогичное уравнение для случая, когда ρ задается формулой Планка [см. (21.5)], возникли затруднения. На них указали голландские специалисты по статистической физике Леонард Орнштейн и Фриц Цернике (1919) [O1]. Позднее этой проблемой занимался Эренфест [E5].

В то время было известно, что выражение Планка для ρ следует из квантового подхода[3]), согласно которому осцилляторы электромагнитного поля могут иметь только энергию, равную $nh\nu$. Однако как Орнштейн и Цернике, так и Эренфест обнаружили, что применение такого же подхода к формуле флуктуаций приводит к неверному результату. Представлялось, что источник затруднений кроется в сделанном Эйнштейном предположении об аддитивности энтропии [см. (4.21)]. По словам Уленбека (частное сообщение), в течение ряда лет это считалось серьезной проблемой. В своей статье 1925 г. Борн, Гейзенберг и Иордан упоминали об этой проблеме как о фундаментальном затруднении [B1]. Но в той же статье было показано, что применение новой квантовой механики к системе невзаимодействующих осцилляторов позволяет получить результат Эйнштейна. В данном выводе важную роль играет некоммутативность координат и импульсов. По словам того же Уленбека, устранение упомянутых трудностей было воспринято как один из первых успехов квантовой механики. (Нам здесь нет необходимости обсуждать дальнейшие работы по совершенствованию подхода Гейзенберга — Борна — Иордана[4]).)

§ 21.2. Спонтанные и индуцированные излучательные переходы

После 1909 г. Эйнштейн продолжал размышлять над проблемой световых квантов еще почти два года. Как отмечалось в гл. 10, в мае 1911 г. он писал Бессо: «Я уже больше не задаю вопрос, существуют ли эти кванты на самом деле. Я больше не пытаюсь воссоздать их, так как знаю теперь, что мой мозг не в состоянии постичь проблему с этой стороны» [E6]. На какое-то время он был готов отступить. В октябре 1911 г. Эйнштейн (ставший к тому времени профессором Пражского университета) сделал доклад о квантовой теории на первом Сольвеевском конгрессе [E7], но к тому времени он уже занялся общей теорией отно-

[3]) Элементарный вывод, данный Дебаем, приведен в § 24.3.

[4]) Отсылаю читателя, интересующегося этим вопросом, к статье Гонзалеса и Вергеланда, где содержится также список литературы по этой теме [G1].

сительности и работал над ней до ноября 1915 г. В 1916 г. Эйнштейн вновь вернулся к проблеме излучения черного тела и добился очередного успеха. В ноябре 1916 г. он написал Бессо: «Меня осенило, как описать поглощение и испускание излучения» [E8]. К тому времени он гораздо глубже проник в суть своего эвристического принципа, что позволило ему дать новый вывод закона излучения Планка. Эйнштейн изложил свой подход в трех работах, две из которых были опубликованы в 1916 г. [E9, E10], а третья — в начале 1917 г. [E11]. Его метод основан на общих гипотезах относительно взаимодействия излучения с веществом, причем не вводится каких-то особых предположений о внутренних свойствах объектов, взаимодействующих с излучением. Эти объекты он предложил «называть в дальнейшем молекулами» [E9]. (При таком подходе совершенно неважно, что этими молекулами могут быть и осцилляторы Планка!)

Эйнштейн рассмотрел газ, состоящий из этих взаимодействующих с электромагнитным излучением молекул. Вся система в целом находится в тепловом равновесии. Обозначим символом E_m энергетические уровни молекулы, а N_m число молекул, находящихся в равновесном состоянии на уровне E_m. Тогда

$$N_m = p_m \exp(-E_m/kT), \tag{21.6}$$

где p_m — весовой множитель. Рассмотрим два энергетических уровня E_m и E_n, таких, что $E_m > E_n$. Далее Эйнштейн ввел новую гипотезу о том, что общее число переходов dW в газе в интервал времени dt задается следующими выражениями:

$$dW_{mn} = N_m(\rho B_{mn} + A_{mn})\,dt \quad \text{для} \quad m \to n, \tag{21.7}$$

$$dW_{nm} = N_n \rho B_{nm}\,dt \qquad \text{для} \quad n \to m. \tag{21.8}$$

Коэффициент A соответствует спонтанным переходам $m \to n$, происходящим с вероятностью, которая не зависит от спектральной плотности излучения ρ. Член, содержащий B, описывает индуцированное испускание и поглощение. В уравнениях (21.7) и (21.8) ρ есть функция от ν и T и, кроме того, предполагается, что «...молекула может переходить из состояния $[E_n]$ в состояние $[E_m]$, поглощая излучение определенной частоты ν... а из состояния $[E_m]$ в состояние $[E_n]$ — испуская излучение такой же частоты» [E9]. Из микроскопической обратимости следует, что $dW_{mn} = dW_{nm}$. Следовательно, применяя уравнение (21.6), получаем

$$A_{mn}p_m = \rho(B_{nm}p_n \exp[(E_m - E_n)/kT] - B_{mn}p_m). \tag{21.9}$$

(Отметим, что второй член в правой части соответствует индуцированному испусканию. Таким образом, если бы не было индуцированного испускания, мы получили бы закон Вина.) Эйнштейн указал, что «постоянные A_{mn} и B_{mn} можно было бы вычислить непосредственно, если бы в нашем распоряжении имелись электродинамика и механика, видоизмененные в смысле гипотезы квантов» [E9]. Тогда их, естественно, еще не было, поэтому Эйнштейн дальше рассуждал так. Для заданного значения

$E_m - E_n$ при $T \to \infty$ мы должны получить закон Рэлея — Эйнштейна — Джинса [см. (19.17)]. Отсюда следует, что

$$B_{mn} p_n = B_{nm} p_m, \tag{21.10}$$

поскольку

$$\rho = \alpha_{mn} \{\exp[(E_m - E_n)/kT] - 1\}^{-1}, \tag{21.11}$$

где $\alpha_{mn} = A_{mn}/B_{mn}$. В заключение Эйнштейн сослался на универсальный характер функции ρ и на закон смещения Вина, уравнение (19.4): «...α_{mn} и $E_m - E_n$ могут зависеть не от особого свойства молекулы, а только от соответствующей частоты ν, [это] вытекает из того, что плотность ρ должна быть универсальной функцией T и ν. Далее, из закона смещения Вина следует, что величина α_{mn} должна быть пропорциональна третьей, а $E_m - E_n$ — первой степени ν. В соответствии с этим имеем

$$E_m - E_n = h\nu, \tag{21.12}$$

где h означает постоянную» [E9].

Смысл уравнения (21.12) очень глубок и не сводится к простому определению символа ν (или h). Это — условие совместимости. Его физический смысл таков: для того чтобы закон Планка следовал из уравнений (21.7) и (21.8), необходимо, чтобы в переходах $m \rightleftarrows n$ участвовал один квант монохроматического излучения. Итак, своим замечательным подходом Эйнштейн установил связь между излучением черного тела и теорией спектров Бора.

По поводу сделанных им в данном выводе предположений Эйнштейн сказал следующее: «...простота гипотез... позволяет мне считать весьма вероятным, что это рассмотрение станет основой будущих теоретических представлений». В этом он оказался совершенно прав.

В двух из трех обсуждаемых здесь работ — [E10, E11] — содержится еще один результат, который сам Эйнштейн считал гораздо более важным, чем данный им вывод закона излучения: световые кванты имеют импульс, равный $h\nu/c$. Об этом результате мы и поговорим в следующем параграфе.

§ 21.3. Завершение построения корпускулярной картины

Световые кванты и фотон. Фотон представляет собой состояние электромагнитного поля со следующими свойствами.

1. Он имеет определенную частоту ν и определенный волновой вектор $\mathbf{k}$.

2. Его энергия

$$E = h\nu \tag{21.13}$$

и импульс

$$\mathbf{p} = h\mathbf{k} \tag{21.14}$$

удовлетворяют закону дисперсии

$$E = c|\mathbf{p}|, \tag{21.15}$$

относящемуся к частице с нулевой массой покоя[5]).

3. Он имеет равный единице спин и (как и все лишенные массы частицы с ненулевым спином) два спиновых состояния. Этими тремя параметрами единственным образом определяется состояние частицы [W1].

При реакциях с участием частиц и при распадах число фотонов в общем случае не сохраняется. К вопросу о несохранении числа фотонов я вернусь в гл. 23, а сейчас хотел бы рассказать о странном зигзаге истории. Термин *фотон* впервые встречается в заголовке статьи «Сохранение фотонов», написанной в 1926 г. известным физиком и химиком Гилбертом Льюисом, работавшим в Беркли. В статье высказано предположение о том, что свет состоит из «...атомов нового типа... неуничтожаемых и несоздаваемых, которые предлагается назвать фотонами» [L2]. Предположение было вскоре забыто, но новое слово сразу же вошло в употребление. В октябре 1927 г. проходил пятый Сольвеевский конгресс; его тема — «Электроны и фотоны».

Когда в 1905 г. Эйнштейн ввел понятие «световых квантов», он имел в виду кванты *энергии*, удовлетворявшие уравнению (21.13). В той работе не было ни уравнения (21.15), ни уравнения (21.14). Иными словами, та законченная корпускулярная картина, которая скрывается за словом «фотон», появилась на свет не сразу. По этой причине в данном параграфе я буду проводить различие между световым квантом (который описывается только выражением $E = h\nu$) и фотоном. Дисбаланс между энергией и импульсом в работе 1905 г., несомненно, связан с тем, что световые кванты были постулированы на основе равновесной статистической механики. В статистической механике равновесных систем устанавливаются соотношения, связывающие полную энергию с прочими макроскопическими переменными, а полный импульс представляет собой тривиальное следствие и играет вспомогательную роль. Такое отличие энергии от импульса гораздо менее выражено в том случае, когда рассматриваются флуктуации относительно равновесного состояния. Эйнштейн пришел к идее наделения световых квантов определенным импульсом, проанализировав статистические флуктуации излучения черного тела. Произошло это в 1916 г. Прежде чем рассказать, что же конкретно сделал Эйнштейн, я еще раз обращаю внимание читателя на тот примечательный факт, что творцу специальной

[5]) Время от времени высказываются предположения о том, что фотон может иметь очень малую отличную от нуля массу. Поэтому большой интерес представляет экспериментальное определение массы фотона. Наиболее точно ее удается определять из астрономических наблюдений. На сегодня верхний предел массы фотона равен $8 \cdot 10^{-49}$ г [D1]. При дальнейшем изложении предполагается, что масса фотона строго равна нулю.

теории относительности понадобилось 12 лет для того, чтобы записать рядом с выражением $E = h\nu$ соотношение $p = h\nu/c$. Подробней мы об этом поговорим в § 25.4.

Флуктуации импульса: 1909 г. Первые результаты Эйнштейна, относящиеся к вопросу об импульсе фотона, приведены в двух статьях 1909 г. Там он дал вывод формулы для флуктуаций импульса, во многом аналогичной формуле для описания флуктуаций энергии [см. (21.5)]. Эйнштейн рассматривал плоское зеркало массой m и поверхностью f, помещенное в полость. Зеркало движется в направлении, перпендикулярном к своей плоскости, и в момент времени t имеет скорость v. За короткий интервал времени от t до $t+\tau$ импульс зеркала меняется от mv до $mv - Pv\tau + \Delta$. Второй член соответствует силе сопротивления, вызываемой давлением излучения (P — соответствующая константа трения). Эта сила должна была бы в конце концов остановить зеркало, если бы не было члена, соответствующего флуктуациям импульса Δ, появление которого вызывается флуктуациями давления излучения. При тепловом равновесии среднее значение квадрата импульса $m^2\langle v^2\rangle$ в интервале времени τ должно оставаться неизменным. Следовательно[6]), $\langle\Delta^2\rangle = 2mP\tau\langle v^2\rangle$. Из закона равнораспределения, применяемого к кинетической энергии зеркала, следует, что $m\langle v^2\rangle = kT$. Таким образом,

$$\langle\Delta^2\rangle = 2P\tau kT. \qquad (21.16)$$

Эйнштейн получил значение P, выраженное через ρ, для зеркала, идеально отражающего излучение в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, но абсолютно прозрачного для излучения других частот. Применив выражение, полученное Планком для ρ, он нашел, что

$$\langle\Delta^2\rangle = (1/c)\ (\rho h\nu + c^3\rho^2/8\pi\nu^2) f\tau d\nu. \qquad (21.17)$$

Сходство уравнений (21.5) и (21.17) сразу же бросается в глаза. Если $h\nu/kT \gg 1$, т. е. функция ρ приближенно описывается экспоненциальным законом Вина, то преобладающее влияние оказывают первые члены. По поводу первого члена уравнения (21.5) Эйнштейн сказал, что он соответствует «движущимся независимо точечным квантам с энергией $h\nu$». Естественно было бы ожидать, что первый член уравнения (21.17) заставит Эйнштейна выдвинуть в 1909 г. еще и «постулат квантов импульса»: монохроматическое излучение низкой плотности в отношении флуктуаций давления ведет себя таким образом, как если бы оно состояло из взаимно независимых квантов импульса $h\nu/c$. Я никак не допускаю, что Эйнштейн мог думать иначе, но выразился он не совсем так.

А сказал он следующее: «Если бы излучение состояло из очень мало протяженных комплексов с энергией $h\nu$, которые движутся независимо друг от друга в пространстве и независимо

---

[6]) Члены порядка $O(\tau^2)$ опускаются, а $\langle v\Delta\rangle = 0$, так как v и Δ взаимно независимы.

отражаются (картина, весьма грубо представляющая гипотезу световых квантов), то вследствие флуктуаций светового давления на нашу пластинку передавались бы такие импульсы, которые изображаются одним только первым членом нашей формулы» [E3] [см. (21.17)]. Он не упомянул прямо квантов импульса или релятивистской зависимости между выражениями $E = h\nu$ и $p = h\nu/c$. Тем не менее, он явно имел в виду концепцию частиц (фотон), так как тут же высказал предположение о том, что «появление электромагнитных полей света должно быть связано с особыми точками так же, как появление электростатических полей — с электронной теорией» [E3]. Перефразируем это утверждение так: вполне может быть, что световые кванты — это частицы в том же смысле, в котором частицами являются электроны. Увязывание понятия «частица» с высокой степенью пространственной локализации вполне типично для того периода. В общем случае это, конечно, неверно.

Импульс фотона появился в физике в явном виде в том же 1909 г. На зальцбургской конференции, где Эйнштейн рассказывал о флуктуациях излучения, присутствовал Иоханнес Штарк, который через несколько месяцев заявил, что в соответствии с гипотезой световых квантов «...полный электромагнитный импульс, испускаемый ускоренным электроном, отличен от нуля... и по абсолютному значению равен $h\nu/c$» [S1]. В качестве примера Штарк рассматривал тормозное излучение, для которого он записал следующее уравнение:

$$m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 = m_1\mathbf{v}_1' + m_2\mathbf{v}_2' + (h\nu/c^2)\,\mathbf{c}. \qquad (21.18)$$

Это было первое выражение, в котором в явном виде в законе сохранения импульса в элементарном процессе фигурировал фотон.

Флуктуации импульса: 1916 г. Сам Эйнштейн впервые в явном виде ввел импульс фотона лишь в 1916 г. при рассмотрении электромагнитного излучения, находящегося в тепловом равновесии с молекулярным газом [E10, E11]. Помимо нового подхода к закону Планка Эйнштейн рассмотрел следующую проблему. В равновесии скорости поступательного движения молекул описываются распределением Максвелла. Каким образом данное распределение сохраняется во времени, когда на молекулы действует давление излучения? Другими словами, что представляет собой броуновское движение молекул в присутствии излучения?

С технической точки зрения задача формулируется так. Если молекула испускает или поглощает некоторое количество энергии излучения ε, целиком распространяющейся в одном направлении, то она испытывает отдачу ε/c. Если же излучение не направленное, как в случае сферической волны, то отдачи нет. Возникает вопрос: что можно сказать о степени направленности испущенного или поглощенного излучения в рассматриваемой системе? Эйнштейн подошел к ответу на этот вопрос так же,

как при рассмотрении движения зеркала в 1909 г., но вместо зеркала в данном случае он рассмотрел молекулы, движущиеся в одном направлении. Здесь опять-таки есть сила $P\nu\tau$, противодействующая движению, и член Δ, описывающий флуктуации. Из закона равнораспределения следует, что $m\langle v^2\rangle = kT$, вследствие чего вновь получаем уравнение (21.16).

Далее Эйнштейн рассмотрел условие совместимости. С помощью уравнений (21.7) и (21.8) он получил по отдельности выражения для $\langle\Delta^2\rangle$ и для P, в которые входят члены, содержащие A и B, а также ρ, где ρ задается законом Планка[7]). Я не буду здесь подробно воспроизводить вычисления и отмечу лишь суть. Чтобы получить одинаковый результат для величин, находящихся в левой и правой частях уравнения (21.16), Эйнштейну пришлось прибегнуть к условию направленности: «Если пучок лучей воздействует на встретившуюся ему молекулу так, что она посредством элементарного процесса получает или отдает в форме излучения некоторое количество энергии $h\nu$ (индуцированное излучение), то молекула всегда будет получать и импульс $h\nu/c$ (при поглощении энергии — в направлении движения пучка, а при испускании — в противоположном направлении)» [E11]. (Спонтанное излучение обсуждается ниже.) Итак, Эйнштейн установил, что для соответствия распределению Планка, а также уравнениям (21.7) и (21.8) излучение должно быть остронаправленным. Так с помощью своего верного и излюбленного метода флуктуаций Эйнштейн вновь получил важный результат: связал квант импульса с квантом энергии. Более того, если оставить в стороне вопрос о спине, можно сказать, что *Эйнштейн выдвинул не только понятие световых квантов, но и гораздо более общую концепцию фотона исключительно на основе статистической механики.*

§ 21.4. Первые признаки озабоченности вторжением случая

Процитированной выше фразе, где Эйнштейн упоминает об импульсе фотона, предшествует высказывание о том, что этот вывод можно считать «достаточно надежно доказанным». Если он и испытывал какие-то затаенные сомнения, то объяснялись они тем, что некоторые уравнения были выведены на основе «квантовой теории, несовместимой с теорией электромагнитного поля Максвелла» [E11]. Более того, его условие наличия импульса достаточно, но не необходимо, как было подчеркнуто Паули в обзорной статье 1924 г.: «Из рассуждений Эйнштейна... не следует с полной определенностью, что его предположения являются единственными предположениями, обеспечивающими

---

[7]) В 1910 г. Эйнштейн провел аналогичный расчет вместе с Хопфом [E12]. Тогда для определения $\langle\Delta^2\rangle$ и P он воспользовался классической теорией электромагнетизма. В результате получилось уравнение (21.16) — дифференциальное уравнение для ρ; его решением является уравнение (19.17).

статистически-термодинамическое равновесие» [P1]. Тем не менее результаты, полученные Эйнштейном в 1917 г., заставили его отбросить сомнения и колебания относительно существования световых квантов. Они стали для него реальностью. В письме Бессо, где речь шла об узких пучках излучения, Эйнштейн писал: «Этим [существование] световых квантов доказано практически наверняка» [E13]. В другом письме, написанном через два года, читаем: «Я не сомневаюсь больше в *реальности* квантов излучения, хотя по-прежнему одинок в этом убеждении» [E14].

В то же время, когда Эйнштейна покинули последние сомнения по поводу существования световых квантов, он впервые высказал огорчение и озабоченность тем, какие теоретические следствия вытекают из новой концепции квантов по отношению к случайности. Эйнштейна беспокоил тот вывод, который он был вынужден сделать из соотношения совместимости [см. (21.16)] применительно к спонтанному излучению: направленность излучения проявляется не только при индуцированных процессах (о чем шла речь выше), но и при спонтанном излучении. Иначе говоря, при спонтанном излучательном переходе молекула испытывает отдачу $h\nu/c$, однако направление импульса отдачи нельзя предсказать заранее! Эйнштейн подчеркнул (и вполне справедливо), что это «слабость теории, [которая] заключается... в том, что... время и направление элементарного процесса представляются случайными» [E11]. Что определяет, в какой момент должно произойти спонтанное испускание фотона? Что определяет направление, в котором он будет двигаться?

Эти вопросы были не новы. Они относились и к другому классу процессов испускания, самопроизвольность которых ставила в тупик физиков с начала века,— речь идет о радиоактивных превращениях. Коэффициент спонтанного испускания был впервые введен Резерфордом в 1900 г., когда он получил[8]) уравнение $dN = -\lambda N dt$, описывающее уменьшение числа атомов эманации радиоактивного тория N, распадающихся за интервал времени dt [R2]. Эйнштейн тоже обратил внимание на сходство двух процессов: «В пользу этой теории говорит также то, что принятый для спонтанного излучения статистический закон есть не что иное, как закон Резерфорда для радиоактивного распада...» [E9]. В другой работе я писал о том, как физики относились к загадке времени жизни радиоактивных веществ [P2], поэтому здесь лишь добавлю следующее: Эйнштейн первым понял, что вероятность спонтанного испускания — неклассическая величина. Никто, кроме него, не представлял себе в 1917 г. всей глубины концептуального кризиса, вызванного существованием спонтанных процессов с определенным временем жизни. По пророческим словам Эйнштейна, «...свойства элемен-

[8]) Это был первый шаг по пути, который спустя два года привел к созданию теории превращений радиоактивных веществ [R1].

тарного процесса, требуемые соотношением [(21.16)], делают почти неизбежным создание подлинно квантовой теории излучения» [E11].

Сразу же после замечания о роли случая читаем: «...впрочем, я полностью уверен в надежности выбранного метода» [E11]. Хотя он и был уверен в правильности выбранного пути, но хорошо представлял себе, что путь этот будет долгим. Случайный характер спонтанных процессов указывал на то, что с классической причинностью не все в порядке. Это беспокойство не оставляло его всю жизнь. Еще в марте 1917 г. он писал по этому поводу Бессо: «Мне кажется, что главная шутка, которую сыграл с нами неистощимый на загадки создатель, пока совершенно не понята» [E15]. Почти все считают, что после 1925 г., когда на основе фундаментальных соображений удалось рассчитать значения коэффициентов A_{mn} и B_{mn}, соль шутки все же удалось понять. Как мы увидим дальше, Эйнштейн в конце концов согласился с этими соображениями, но так никогда и не признал, что они действительно *фундаментальные*. Всю жизнь он продолжал считать, что соль шутки еще не понята до конца. Отрывок из письма Борну от 1920 г. еще раз демонстрирует, что после 1917 г. Эйнштейн так и не принял окончательно квантовую теорию: «Эта возня с причинностью вызывает и у меня массу трудностей. Можно ли вообще понять квантованное поглощение и испускание света, исходя только из требований причинности, или же всегда будет оставаться статистический осадок? Должен сознаться, что мне не хватает убежденности; однако мне было бы очень горько отказаться от строгой причинности» [E16].

§ 21.5. Отступление: квантовые условия для классических уравнений движения с неразделяющимися переменными

В мае 1917 г., закончив работу над тремя статьями, посвященными квантовой теории излучения, Эйнштейн написал о тех ограничениях, которые налагает на классически разрешенные орбиты в фазовом пространстве «старая» квантовая теория [E17]. Через несколько месяцев вышло краткое математическое добавление [E18] к предыдущей работе. Эйнштейн больше не возвращался к этому вопросу, и в течение долгого времени другие ученые также не проявляли к нему большого интереса. Однако недавно важность и новаторский характер этих работ Эйнштейна были признаны как математиками, так и специалистами по квантовой физике и химии. Единственная причина, по которой я вспоминаю об этих статьях сейчас, заключается в том, что Эйнштейн написал их в то же время, что и обсуждавшиеся работы по квантовой физике.

Эйнштейн обобщил условия Бора — Зоммерфельда, относящиеся к системе с l степенями свободы. Эти условия имеют вид $\int p_i dq_i = n_i h$, $i = 1, \ldots, l$, где q_i — координаты, p_i — сопряженный

им импульс, n_i — целые квантовые числа. Эти условия были получены для случая, когда существует система координат, в которой возможно разделение переменных в классических уравнениях движения. Таким образом, данные условия (если они вообще выполнимы) зависят от выбора подходящей системы координат. Эйнштейн предложил инвариантное относительно системы координат обобщение этих условий, которое даже не требует разделения переменных; достаточно, чтобы движение было множественно периодическим. Обобщение полученного Эйнштейном результата представляет определенный интерес для математиков. Для современной физики и химии важно то, что можно установить связь между орбитами старой квантовой теории и полуклассическим приближением Вентцеля — Крамерса — Бриллюэна, используемым в квантовой механике. Например, можно объединить полуклассический подход к рассмотрению движения ядра в молекуле с методом рассмотрения движения электронов, предложенным Борном и Оппенгеймером. Ссылки на последние работы в данной области приведены в [B2, M1].

§ 21.6. Эффект Комптона

Вернемся теперь к рассказу о фотоне и посмотрим, что было дальше. После 1917 г. Эйнштейн поверил, что световым квантам суждена в физике долгая жизнь, и, естественно, стал искать новые явления, подтверждающие существование фотонов и приводящие к наблюдаемым отклонениям от классической картины природы. Однако это ему не удалось. В 1921 г. Эйнштейну показалось, что он обнаружил новый квантовый критерий [E19], но вскоре выяснилось, что это ложный путь [E20, K1]. После 1917 г. в области исследования световых квантов не происходило ничего примечательного до 1923 г., когда Артур Комптон [C1] и Дебай [D2] независимо сделали важное открытие [9]) — получили релятивистское кинематическое выражение для рассеяния фотонов на покоящихся электронах:

$$h\mathbf{k} = \mathbf{p} + h\mathbf{k}', \tag{21.19}$$

$$hc|\mathbf{k}| + mc^2 = hc|\mathbf{k}'| + (c^2p^2 + m^2c^4)^{1/2}. \tag{21.20}$$

Почему эти элементарные уравнения не были опубликованы на пять или даже десять лет раньше, ведь их вполне можно было получить и тогда? Они могли понравиться даже тем, кто возражал против представления о квантовом составе излучения, так как (вне зависимости от квантовой динамики) из них непосредственно вытекали значительные отличия от классических теорий

[9]) Эйнштейн придавал большое значение и другому важному результату, полученному в то время,— эффекту, открытому Отто Штерном и Вальтером Герлахом [E21]. Вместе с Эренфестом он предпринял преждевременную попытку его толкования [E22].

рассеяния света веществом [10]), и, таким образом, появлялась возможность путем простых опытов установить, действительно ли существует фотон.

Я не могу окончательно ответить на поставленный выше вопрос. В частности, мне неясно, почему эти соотношения не записал сам Эйнштейн. Можно, однако, отметить два очевидных фактора. Во-первых, поскольку фотоны были «с порога» отвергнуты подавляющим большинством физиков, видимо, не находилось и желающих проверять идею, в которую они и так не верили. Во-вторых, только к 1922 г. появились действительно убедительные свидетельства несправедливости классической картины. Именно это последнее обстоятельство заставило Комптона и Дебая обратить внимание на квантовый подход [11]). Кстати, Дебай в своей работе [D2] ссылался на статьи Эйнштейна о направленном излучении. Комптон же вообще не упоминал Эйнштейна.

В статье Комптона помимо уравнений (21.19) и (21.20) приводятся также результаты решающего эксперимента. Из этих уравнений следует, что сдвиг длины волны рассеянного фотона по сравнению с налетающим задается выражением

$$\Delta\lambda = (h/mc)\,(1 - \cos\theta), \qquad (21.21)$$

где θ — угол рассеяния фотона. Комптон обнаружил, что в пределах погрешностей измерений эксперименты подтверждают справедливость этой формулы [12]). Высокое качество экспериментов иллюстрируется тем, что полученное значение комптоновской длины волны: $h/mc \approx 0{,}0242$ Å (0,242 нм) отличается от современного значения менее чем на 1 % (подробно о современном положении дел в этой области рассказано в [W2]). В результате Комптон сделал следующий вывод: «Экспериментальное подтверждение теории с большой убедительностью указывает на то, что квант излучения переносит помимо энергии и направленный импульс» [13]).

---

[10]) Подробно эти теории рассмотрены в прекрасной монографии Стьюэра, посвященной эффекту Комптона [S2].

[11]) То, что оба ученых занялись кинематикой фотона примерно в одно время, не случайно. Дебай в своей работе сослался на доклад Комптона 1922 г., где анализируется критика классической теории. Подробные сведения о хронологии событий 1922—1923 гг. приведены в [S2, с. 235]. Об изменении подхода Комптона говорится в [S2, гл. 6].

[12]) Изучалась K-линия в спектре рассеяния рентгеновского излучения, генерировавшегося молибденовым антикатодом, на графите. Комптон подчеркивал, что в качестве рассеивающих материалов следует использовать только легкие элементы, с тем чтобы электроны действительно можно было считать слабо связанными. Анализировалось рентгеновское излучение при углах рассеяния 45, 90 и 135°.

[13]) Паули, развивая работы Комптона и Дебая, распространил результаты, полученные Эйнштейном в 1917 г., на излучение, находящееся в равновесии со свободными электронами [P3]. Эйнштейн и Эренфест позднее рассмотрели связь между подходами Паули и Эйнштейна [E23].

Это открытие «произвело сенсацию среди физиков того времени» [A1]. Событие такого огромного значения неизбежно вызвало самые разные отклики, но, тем не менее, вскоре фотон был принят всеми. Зоммерфельд упомянул об эффекте Комптона в новом издании своей книги «Строение атома и спектральные линии», где сказал следующее: «Это, возможно, самое важное открытие, которое можно было сделать на данном этапе развития физики» [S3].

А что же говорил по этому поводу Эйнштейн? Спустя год после опыта Комптона Эйнштейн писал в заключительном абзаце популярной статьи, опубликованной в газете «Berliner Tageblatt»: «Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул, не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи количества движения» [E24]. Здесь, говоря о корпускулах (т. е. о частицах), Эйнштейн сформулировал «постулат импульса» примерно в тех же выражениях, что и постулат наличия квантов энергии, предложенный им в 1905 г. И там, и здесь использованы слова «...излучение ведет себя так, как если бы оно состояло...».

Но Эйнштейн был по-прежнему неудовлетворен (и испытывал неудовлетворенность до конца своих дней). По его мнению, настоящей теории все еще не было. В той же статье он писал: «Итак, теперь мы имеем две теории света, обе необходимые и — как приходится признать сегодня — существующие без всякой логической взаимосвязи, несмотря на 20 лет колоссальных усилий физиков-теоретиков».

Период с 1923 по 1924 г. показал, насколько обособлен был Эйнштейн в своем отношении к квантовой теории. Правда, оставался еще несломленным мощный очаг сопротивления концепции фотона, группировавшийся вокруг Нильса Бора.

Глава 22. ИНТЕРЛЮДИЯ: ПРЕДЛОЖЕНИЕ БОРА — КРАМЕРСА — СЛЭТЕРА

Sie haben sich heiss und innig geliebt [1]).

Элен Дюкас

В январе 1924 г. Нильс Бор, Хендрик Антони Крамерс и Джон Кларк Слэтер представили в «Philosophical Magazine» статью [B1], содержавшую кардинально новый теоретический подход к рассмотрению взаимодействия света с веществом. Написана она была после открытия Комптона, но, тем не менее, в ней отвергалось существование фотонов. Ко времени написания этой статьи Бор и Эйнштейн уже встретились лично. В данной главе, посвященной предложению БКС (Бора, Крамерса,

[1]) Они любили друг друга горячо и нежно (*нем.*).— *Примеч. пер.*

Слэтера), я ставлю перед собой две цели: дать послесловие к рассказу о фотоне и сделать несколько вводных замечаний к диалогу Бор — Эйнштейн, о котором более подробно мы поговорим ниже.

Я уже отмечал, что на Эйнштейна работа Бора 1913 г. сразу произвела большое впечатление. Тогда они еще не были знакомы; через несколько лет они встретились лично, а до тех пор внимательно следили за работой друг друга по публикациям. Кроме того, Эренфест постоянно информировал Эйнштейна о том, что делает Бор: «Эренфест подробно рассказывает мне, что происходит на „творческой кухне" Нильса Бора; у него должен быть первоклассный ум, очень дальновидный, критически настроенный и постоянно преследующий великие замыслы» [E1]. Эйнштейн навсегда сохранил глубокое уважение к новаторским работам Бора. Вот что писал Эйнштейн, когда ему было под семьдесят: «Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы [т. е. физики второго десятилетия XX в.] оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли» [E2].

Эйнштейн и Бор встретились наконец весной 1920 г. в Берлине. К тому времени оба стали известными учеными, которым суждено было оставить незгладимый след в истории физики XX в. Эта встреча принесла не только научные плоды. Через некоторое время Эйнштейн признался Бору: «Общение с Вами доставило мне удовольствие, которое я редко испытывал в обществе других» [E3]. Через два дня он писал Эренфесту: «У нас побывал Бор, и я полюбил его так же, как и ты. Он похож на чрезвычайно впечатлительного ребенка, зачарованного окружающим миром» [E4]. В следующем месяце Бор ответил Эйнштейну: «Встреча и беседа с Вами стали для меня одним из главных событий в жизни» [B2]. Через несколько лет в одном из писем Эйнштейн так обратился к Бору: «Дорогой, или скорее, любимый Бор!» [E5]. Однажды, когда я беседовал об отношениях Эйнштейна и Бора с Элен Дюкас, она произнесла слова, которые я взял эпиграфом к этой главе: «Они любили друг друга горячо и нежно».

В те годы царила гармония и в научных отношениях этих ученых. В 1922 г. Эйнштейн писал Эренфесту: «Сейчас я читаю крупный доклад Бора [2]), где он удивительно ясно излагает свои представления. Это действительно гениальный человек. Просто счастье, что он есть. Я полностью уверен в правильности его подхода» [E6]. Особое впечатление на Эйнштейна произвело то,

---

[2]) Видимо, речь идет о докладе, который Бор готовил к третьему Сольвеевскому конгрессу (апрель 1921 г.). Из-за болезни он не смог прочитать его лично [B3].

что Бор выдвинул и применил принцип соответствия [E6]; об этой концепции они неоднократно спорили тогда и позже.

Все, кто знал Бора лично, подтвердят, насколько глубоко и точно охарактеризовал его Эйнштейн в конце жизни: «Он излагает свое мнение так, точно постоянно движется наощупь; он ничуть не похож на человека, знающего истину в последней инстанции» [E7]. Читая работы Бора, ясно ощущаешь, как трудно давалось ему продвижение вперед. «Никогда не высказывайтесь яснее, чем вы думаете»,— предостерегал он и сам следовал этому совету. Многие статьи Бора написаны довольно путано. Я несколько раз помогал ему излагать его мысли на бумаге и знаю, каких огромных усилий стоило ему найти удачное выражение. Не видел, как писал Эйнштейн, так как никогда не помогал ему в этом, но его работы говорят сами за себя. Первые статьи Эйнштейна кратки, просты по содержанию, лаконичны. Тон их категоричен, хотя посвящены они проблемам, находившимся в стадии исследования. Так, ни одно из утверждений, сделанных в статье о световых квантах 1905 г., не потребовалось пересматривать в свете дальнейших достижений физики.

Впервые Эйнштейн с Бором встретились в 1920 г., за несколько лет до того, как произошло столкновение их научных воззрений из-за фундаментальных расхождений в подходе к проблемам физики. Они встречались и позднее, но не очень часто; переписывались, но не очень интенсивно. Я наблюдал их обоих лет через 30 после первой встречи, когда противоречия во взглядах обоих ученых на квантовую механику стали непримиримыми. Но ни годы, ни дальнейшие события не повлияли на их взаимное уважение и расположение.

А теперь перейдем к рассмотрению предложения БКС.

Как уже подчеркивалось в § 19.6, большинство физиков-теоретиков в первое десятилетие квантовой эры считали, что нужно любой ценой сохранить традиционное непрерывное описание поля свободного излучения и что квантовые загадки излучения можно будет в конце концов разрешить, пересмотрев свойства взаимодействия излучения с веществом. Предложение БКС является крайним примером такого рода позиции. Его авторы предположили, что процесс излучения характеризуется в высшей степени необычными свойствами. Причины этого, по их мнению, «кроются не в отходе от электромагнитной теории в том, что касается законов распространения света в свободном пространстве, а в особенностях взаимодействия виртуального поля излучения с облучаемыми атомами» [B1]. Прежде чем описать эти свойства, должен подчеркнуть, что статья БКС представляет собой скорее не конкретное исследование, а программу работ. В ней полностью отсутствует математический аппарат [3]). Позднее вы-

[3]) Так же было написано и дополнение Бора 1925 г. [B4]. Шрёдингер [S1] и в особенности Слэтер [S2] пытались изложить идеи БКС с помощью математического аппарата. См. также воспоминания Слэтера [S3], касающиеся того периода.

ясилось, что эта программа не позволяет устранить трудности «старой» квантовой теории, но, тем не менее, статья имела большое значение и, как будет показано, стимулировала появление ряда крупных экспериментальных работ. Обсудим два основных парадокса, о которых идет речь в статье БКС.

Первый парадокс. Рассмотрим атом, который испускает излучение при переходе из более высокого в более низкое энергетическое состояние. Бор, Крамерс и Слэтер предположили, что в этом процессе «проявляются два вида энергии: непрерывно изменяющаяся энергия поля и дискретно изменяющаяся энергия атома» [S2]. Но как может сохраняться энергия, если одна ее часть изменяется непрерывно, а другая дискретно? Бор, Крамерс и Слэтер дали следующий ответ [B1]: «При рассмотрении переходов, которые являются существенной чертой квантовой теории, мы отказываемся... от непосредственного применения законов сохранения энергии и импульса». Авторы предложили считать, что энергия и импульс не сохраняются в отдельных элементарных процессах и соответствующие законы сохранения выполняются лишь статистически, т. е. в среднем для большого числа таких процессов.

Бор размышлял над идеей несохранения энергии еще за несколько лет до выдвижения предложения БКС [B5][4]). Однако первым рассмотрел (и отверг) такую возможность не Бор, а Эйнштейн. В 1910 г. он писал одному из друзей: «Сейчас у меня появились большие надежды на решение проблемы излучения без привлечения световых квантов. Мне ужасно любопытно, что из этого выйдет. При этом нужно отказаться от закона сохранения энергии в его нынешнем виде» [E9]. Через несколько дней Эйнштейн с огорчением признался: «С решением проблемы излучения опять ничего не вышло. Дьявол сыграл со мной отвратительную шутку» [E10]. Еще раз той же проблемы Эйнштейн коснулся в 1911 г. на Сольвеевском конгрессе, где отметил, что его формулу для флуктуаций энергии излучения черного тела можно толковать двояко. «Остается только выбор между [квантовой] структурой излучения и отказом от строгого выполнения закона сохранения энергии». Эйнштейн отверг второй вариант. Кто же осмелится принять такое решение? «Мы все согласны, что закон сохранения энергии должен соблюдаться» [E11]. Однако похоже, что не все были в этом убеждены. В 1916 г. с предложением о статистическом подходе к закону сохранения энергии выступил Нернст [N1][5]). В январе 1922 г. Зоммерфельд заметил, что «наиболее безобидным» способом примирить квантовые явления с волновой теорией света служит отказ от закона сохранения энергии [S4]. Аналогичные соображе-

[4]) Из письма Эренфеста Эйнштейну видно, что Бор начал раздумывать над таким подходом по крайней мере еще в 1922 г. [E8].

[5]) Название статьи Нернста звучит так: «О попытке перехода от квантовомеханического подхода к предположению о непрерывном изменении энергии».

ния высказывали и многие другие физики [K1]. Таким образом, предложение БКС можно считать попыткой непосредственно рассмотреть следствия идеи, уже обсуждавшейся в течение некоторого времени.

Для того чтобы лучше понять позицию Бора в 1924 г., необходимо прежде всего осознать, что для него основным надежным связующим звеном между классической и квантовой физикой был принцип соответствия. Однако принцип соответствия отнюдь не помогает понять природу световых квантов: вопрос о квантовом или волновом описании света выходит за рамки данного принципа. Фотонно-волновой дуализм — первый пример того, что стало позднее называться дополнительностью. Теория Бора, Крамерса и Слэтера, отвергавшая фотоны и приносившая закон сохранения энергии в жертву непрерывной картине описания распространения света, исторически представляет собой последний бастион старой квантовой теории. Поэтому один из творцов квантовой механики с полным основанием мог несколько лет спустя называть это предложение отражением апогея кризиса старой квантовой теории [H1]. Однако помимо отказа от законов сохранения энергии и импульса работа БКС содержала и другие неординарные предложения.

Второй парадокс. Был еще один вопрос, который (как мы видели) тревожил Эйнштейна с 1917 г.: откуда электрон «знает», когда испускать излучение при спонтанном переходе?

Из работы БКС, вообще говоря, следовало, что истинно спонтанных переходов нет. Авторы приписывали каждому данному состоянию атома «виртуальное поле излучения», содержавшее все возможные частоты, излучаемые при переходах в другие стационарные состояния, а также предполагали следующее: «...переходы, которые [в теории Эйнштейна 1917 г.] считаются спонтанными, по нашему мнению, являются *индуцированными* [курсив мой.— *А. П.*] виртуальным полем». В соответствии с работой БКС спонтанные переходы в конкретное конечное состояние связаны с действием механизма виртуального поля посредством «вероятностных законов, аналогичных тем, которые следуют из теории Эйнштейна для индуцированных переходов». Таким образом, «атому нет необходимости знать заранее, какой переход он совершит» [S2]. Итак, спонтанное испускание увязывается с действием виртуального поля, но это действие не подчиняется закону причинности. Я не буду подробно обсуждать предлагаемое в работе БКС описание индуцированного испускания и поглощения, а также других процессов излучения. Достаточно отметить, что все они, по мнению авторов, вызываются виртуальными полями, и от причинности приходится отказаться. В статье 1924 г. Слэтер [S2] отметил, что у этой теории «есть непривлекательные черты... но на данном этапе трудно представить себе, как от них избавиться».

Но как же быть с эффектом Комптона? Подтвержденное опытом уравнение (21.21) основано на законах сохранения, вопло-

щенных в уравнениях (21.19) и (21.20). Однако, как утверждали Бор, Крамерс и Слэтер, эти уравнения выполняются статистически, а результат экспериментов по измерению $\Delta\lambda$ соответствует лишь среднему сдвигу длины волны. Действительно, в то время, когда было сделано предложение БКС, *еще не было прямого экспериментального подтверждения выполнения законов сохранения энергии и импульса или наличия причинности*. Это одна из причин того, что возражения против предложения БКС (которые высказывали многие физики, «возможно, даже большинство» [P1][6])) вначале звучали не очень решительно. Так, Паули писал Бору, что он не верит в его теорию, но что «...ничего нельзя доказать логически, а имеющихся данных недостаточно для того, чтобы занять ту или иную позицию» [P1]. Но вскоре ситуация коренным образом изменилась.

Мне кажется, что была еще одна причина такой нерешительной позиции физиков того времени. Физическое сообщество оказалось в редчайшей ситуации. Эйнштейн, конечно, был не согласен с предложением БКС. Раньше он уже думал о несохранении энергии и отверг такой подход. Отказ от строгой причинности также противоречил его внутреннему убеждению. Таким образом, между Эйнштейном и Бором, двумя крупнейшими авторитетами того времени, назрел конфликт (слово *конфликт* употребил сам Эйнштейн[7])). Принять чью-либо сторону означало сделать выбор между двумя наиболее почитаемыми физиками. В идеале личные соображения такого рода не должны влиять на решение научных проблем, но в жизни это не всегда так. Вот что писал по этому поводу Паули, имея в виду предложение БКС: «Даже если бы я по каким-то психологическим соображениям пытался составить мнение по научным вопросам, исходя из уважения к авторитету (что, однако, как Вы знаете, для меня совершенно немыслимо), то все равно это было бы логически невозможно (по крайней мере, в данном случае), так как мнения этих авторитетов диаметрально противоположны» [P1].

Даже контакты конфликтующих сторон в тот период были лишь косвенными. Они не переписывались по проблемам, затронутым в статье БКС [E12]. Насколько я знаю, они не встречались лично в то время, хотя Бор неоднократно говорил Паули, что ему очень хотелось бы знать мнение Эйнштейна [P1]. Гейзенберг писал Паули о том, что он видел Эйнштейна в Геттингене и у того есть «сотня возражений» [H2]. Немного позже с Эйнштейном встретился и Паули, после чего он направил Бору

---

[6]) Среди тех, кто первоначально считал предложение БКС шагом в правильном направлении, были Борн, Шрёдингер и Р. Ладенбург.

[7]) Датская газета «Politiken» 25 октября 1924 г. опубликовала сообщение о разногласиях между Бором и Эйнштейном. В результате редактор одной из немецких газет обратился к Эйнштейну за разъяснениями [J1]. Эйнштейн послал краткий ответ [E12], в котором признал, что конфликт имеет место, но отметил, что переписка по этому поводу между ним и Бором не велась.

подробный перечень высказанных Эйнштейном критических замечаний [P1].

Эйнштейн провел по работе БКС семинар, где и высказал свои возражения. Он писал Эренфесту, что эта идея — «его старая приятельница, но она потеряла доброе имя» [E13]. Примерно в то же время Эйнштейн составил список из девяти возражений, который я не буду воспроизводить здесь полностью, а лишь приведу несколько примеров. «Какие критерии должны обусловливать состояние виртуального поля, соответствующее возвращению ранее свободного электрона на боровскую орбиту? Не ясно... Принципиальный отказ от причинности допустим только в чрезвычайно критических обстоятельствах» [E14]. В подходе к проблеме причинности, которая тревожила его уже семь лет, он не соглашался ни на какие исключения. Эйнштейн както признался Борну, что ему невыносима сама мысль, будто электрон может свободно выбирать импульс и направление движения [E15]. Проблема причинности продолжала беспокоить Эйнштейна в течение долгого времени после того, как опыт показал, что объяснение обоих парадоксов, данное в работе БКС, было неверным.

Экспериментальное решение проблемы причинности. Идеи, изложенные в работе БКС, повлекли за собой разработку Вальтером Боте и Хансом Гейгером метода совпадений, который они применили для того, чтобы проверить, действительно ли, как того требует причинность, при эффекте Комптона вторичный фотон и выбитый электрон образуются одновременно [B6]. Боте и Гейгер получили следующий результат: обе частицы рождаются в интервал времени, меньший 10^{-3} с [B7, B8]. Таким образом, в пределах погрешностей измерений была восстановлена причинность и опровергнута случайность времени рождения, вытекавшая из работы БКС. Сейчас интервал времени рождения частиц Δt оценивается так: $\Delta t \leqslant 10^{-11}$ с [B9].

Экспериментальное решение проблемы сохранения энергии-импульса. Выполнение указанных законов в индивидуальных процессах было установлено для эффекта Комптона самим Комптоном и Ф. Саймоном. При помощи камеры Вильсона они проверили для фотоэлектронов и выбитых электронов справедливость соотношения

$$\operatorname{tg}\varphi = -[(1 + h\nu/mc^2)\operatorname{tg}(0/2)]^{-1} \qquad (22.1)$$

в случае индивидуальных событий, где φ и 0 — соответственно углы рассеяния электрона и фотона, ν — частота падающего излучения [C1].

Так пал последний бастион сопротивления идее фотона. Взгляды Эйнштейна восторжествовали. Результаты экспериментов были восприняты с большим облегчением (см., например, [P2][8])). Бор достойно принял результаты опытов и предложил

[8]) Работа Паули 1925 г., посвященная предложению БКС, опубликована в его избранных трудах [P3].

«...организовать нашим революционным усилиям самые пышные похороны» [B10]. Теперь он был готов к еще более радикальным методам разрешения квантовых парадоксов. В июле 1925 г. он писал: «Нужно быть готовыми к тому, что необходимое обобщение классической электродинамики потребует коренного пересмотра тех концепций, на которых до сих пор основывалось описание природы» [B4].

Дальше Бор коснулся диссертации де Бройля и работы Эйнштейна, посвященной квантовому газу (о чем пойдет речь в следующей главе): настало время коренного пересмотра концепций.

Глава 23. РАСПАД ЕДИНСТВА: РОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ

§ 23.1. От Больцмана к Дираку

Эта история началась с письма, написанного в июне 1924 г. [B1] молодым бенгальцем по имени Шатьендранат Бозе. Предыдущие пять его статей ничем особенным не выделялись. Темой письма была шестая его статья, отвергнутая референтом журнала «Philosophical Magazine» [B2]. Письмо Бозе было адресовано Эйнштейну, который в свои 45 лет был давно признан мировой знаменитостью как коллегами-учеными, так и общественностью. В этой главе я расскажу о том, что произошло в научной карьере обоих ученых в течение шести месяцев, прошедших с момента получения Эйнштейном письма Бозе. Судьба Бозе круто переменилась — практически неизвестный раньше, он превратился в физика, имя которого будут помнить всегда. Для Эйнштейна этот период был лишь интерлюдией [1]). К тому времени он уже полностью погрузился в проблемы создания единой теории поля. Насколько грандиозны достижения Эйнштейна, можно судить хотя бы по тому, что результаты, полученные им за эти шесть месяцев, не принадлежат даже к числу пяти его крупнейших работ, хотя и этих результатов было бы достаточно для того, чтобы он навсегда вошел в историю физики.

В шестой статье Бозе речь идет о новом выводе закона Планка. Вместе с письмом Бозе послал Эйнштейну экземпляр рукописи статьи, написанной на английском, и попросил его содействия в ее публикации в журнале «Zeitschrift für Physik» в том случае, если он сочтет статью достойной внимания. Эйнштейн выполнил просьбу Бозе. Он сам перевел статью на немецкий и представил ее в журнал, снабдив следующим примечанием: «Вывод формулы Планка, предложенный Бозе, является, по моему мнению, большим достижением. Использованный им

[1]) В 1925 г. Эйнштейн сказал по поводу своей работы в области квантовой статистики: «Это было так, между прочим» [S1].

метод дает также квантовую теорию идеального газа, которую я изложу в другом месте».

Не буду вдаваться в историю создания квантовой статистики, а коснусь только вклада Эйнштейна в эту область. Тем не менее по ряду причин я должен вкратце изложить содержание работы Бозе. Во-первых, это поможет нам понять, почему Эйнштейн на время отвлекся от основного направления своих исследований. Во-вторых, это облегчит обсуждение работ Эйнштейна, посвященных молекулярному газу. (О них речь пойдет в § 23.2, за исключением одной важной темы, которую мы обсудим в следующей главе,— я имею в виду последнее обращение Эйнштейна к проблеме флуктуаций.) В-третьих, это объяснит, почему Эйнштейн небезоговорочно принял результаты Бозе. В написанном в июле письме Эренфесту он хотя и не отказался от первоначальной высокой оценки работы Бозе, но все же выразил некоторые сомнения: «Вывод Бозе элегантен, но суть его остается туманной» [E1]. В-четвертых, это покажет, насколько новаторской оставалась в то время концепция фотона, а также позволит по-новому взглянуть на вопрос о спине фотона.

Через много лет Бозе вспоминал, что тогда он не представлял себе, насколько содержание его статьи противоречит логике классического подхода. (Такого рода слепота довольно типична для переломных периодов, хотя и не является правилом. В качестве примера блестящего исключения можно привести работу Эйнштейна о световых квантах 1905 г.) «Я не представлял себе, что сделал действительно что-то новое... Я не настолько разбирался в статистике, чтобы понять, насколько мой подход отличается от того, который мог бы предложить сам Больцман на основе своей статистики. Вместо того, чтобы представлять себе световые кванты в виде частиц, я говорил об этих состояниях. Кстати, тот же вопрос задал мне при встрече [происшедшей в октябре или ноябре 1925 г.] и Эйнштейн; он спросил, как я додумался до такого метода вывода формулы Планка?» [M1].

Чтобы ответить на вопрос Эйнштейна и понять, почему Бозе считал, что он применил тот же подход, который мог бы использовать Больцман, мне придется сделать небольшое отступление.

В § 4.2 уже говорилось, что логически и исторически классическая статистика развивалась по следующему пути:

Мелкозернистый подсчет → Крупнозернистый подсчет.

Такова же, естественно, и логика квантовой статистики, но на практике события развивались в противоположном направлении, от крупнозернистого подсчета к мелкозернистому. При создании старейшей квантовой статистики, статистики Бозе — Эйнштейна (БЭ), исторический ход событий был таков.

1924—1925 гг. Введение нового крупнозернистого подсчета, сначала Бозе, а затем Эйнштейном. Об этом в основном пойдет речь в данной главе.

1925—1926 гг. Появление нерелятивистской квантовой механики. Понимание того, как эта новая теория должна быть дополнена мелкозернистым подсчетом, с тем чтобы она приводила к статистике БЭ, пришло отнюдь не сразу [H1].

1926 г. Как это сделать, было показано Полем Адриеном Морисом Дираком. Напомню сначала предложенную Больцманом формулу мелкозернистого подсчета для дискретной модели классического идеального газа, состоящего из N частиц с полной энергией E. Пусть имеется n_i частиц с энергией ε_i [см. § 4.2, в частности уравнения (4.4) и (4.5)]:

$$N = \sum_i n_i, \qquad E = \sum_i \varepsilon_i n_i. \tag{23.1}$$

Тогда соответствующее число микросостояний w задается выражением

$$w = N! \left(\prod_i n_i! \right)^{-1} \quad \text{(статистика Больцмана).} \tag{23.2}$$

Дирак указал, что в случае, рассмотренном Бозе и Эйнштейном, уравнение (23.2) должно быть заменено следующим соотношением:

$$w = 1 \quad \text{(статистика БЭ).} \tag{23.3}$$

Для N частиц допускается единственное симметричное микросостояние. Далее Дирак показал, что из уравнения (23.3) следует закон излучения черного тела, уравнение (19.6) [D1]. Таким образом, он завершил продолжавшийся более четверти века поиск обоснования закона Планка.

Конечно, в то время, когда Бозе и Эйнштейн писали свои первые работы по квантовой статистике, уравнение (23.3) еще не было получено. Они действовали наугад, но провидчески. А теперь рассмотрим, что же конкретно сделал Бозе.

§ 23.2. Бозе

Статья Бозе [B3] — четвертая и последняя революционная работа старой квантовой теории (первые три были написаны Планком [P1], Эйнштейном [E2] и Бором [B4]). Подход Бозе лишал закон Планка всех наносных элементов электромагнитной теории и сводил его вывод к изложению наиболее существенных моментов. Бозе рассмотрел закон теплового равновесия для частиц со следующими свойствами: их масса равна нулю, они имеют два состояния поляризации, число частиц не сохраняется, они подчиняются новой статистике. Работой Бозе как бы исподволь в физику вводятся две новые идеи. Одна из них — понятие о частице с двумя состояниями поляризации — вызвала у Бозе небольшое недоумение. Вторая идея — представление о несохранении числа фотонов. Я не знаю, заметил ли это сам Бозе, но всяком случае в его статье прямо об этом ничего не говорится.

Письмо Бозе Эйнштейну начинается так: «Уважаемый г-н Эйнштейн. Осмеливаюсь предложить Вашему вниманию свою статью. Очень хотелось бы знать, что Вы думаете о ней. Я попытался получить коэффициент $8\pi\nu^2/c^3$, встречающийся в законе Планка, не основываясь на классической электродинамике...» [B1]. В письме Эйнштейна Эренфесту есть следующая фраза: «...индиец Бозе дал прекрасный вывод закона Планка, включая константу [т. е. $8\pi\nu^2/c^3$]» [E1]. Ни в одном из этих писем не упоминаются другие части формулы Планка. В чем же дело, почему такое внимание к коэффициенту $8\pi\nu^2/c^3$?

Для вывода закона Планка необходимо знать число состояний Z^s в интервале частот от ν^s до $\nu^s + d\nu^s$. Обычно число Z^s определялось путем подсчета числа стоячих волн в полости объемом V. При этом получается следующий результат:

$$Z^s = 8\pi(\nu^s)^2 V\, d\nu^s/c^3. \qquad (23.4)$$

Бозе был рад, что ему удалось обнаружить новый вывод этого выражения для Z^s, который позволил по-новому, с позиций корпускулярного подхода, истолковать его смысл. Вывод Бозе основан на замене подсчета частот волн подсчетом ячеек в фазовом пространстве одной частицы. Вот как выглядит его вывод. Проинтегрируем элемент фазового пространства одной частицы $dx\,dp$ по V и по всем импульсам от p^s до $p^s + dp^s$; для учета поляризации введем множитель 2. Таким образом, получим $8\pi V(p^s)^2\,dp^s$. Поскольку $p^s = h\nu^s/c$, это выражение равно h^3Z^s. Следовательно, Z^s есть число ячеек размером h^3, содержащихся в рассматриваемой области фазового пространства частицы. Хотя выглядит это все совершенно невинно, данный результат был исключительно нов. Вспомните, что уравнения, описывающие эффект Комптона, были получены лишь за полтора года до этого. В этом выводе новое применение находит и выражение $p = h\nu/c$!

Прежде чем вернуться к последней части вывода Бозе, вкратце остановлюсь на вопросе о спине фотона. Введя для учета поляризации множитель 2, Бозе отметил, что это, «вероятно, необходимо». Его колебания совершенно понятны — кто в 1924 г. слышал о частице с двумя состояниями поляризации? В течение некоторого времени в этом вопросе оставались неясности. После открытия спина у электрона Эренфест просил Эйнштейна рассказать, «как релятивистски корректно можно сформулировать аналогичную гипотезу для световых корпускул» [E3]. Хорошо известно, что это довольно деликатная проблема, так как в данном случае, конечно, нет покоящейся системы отсчета, в которой можно было бы дать определение спина. Более того, калибровочная инвариантность не позволяет однозначно отделить орбитальный момент от собственного углового момента (см., например, [J1]). Неудивительно поэтому, что в 1926 г. вопрос о спине фотона представлялся Эйнштейну недостаточно ясным. Он даже сказал, что «...склонен сомневаться в том, может ли выполняться

в квантовой теории закон сохранения углового момента. Во всяком случае, его смысл гораздо менее глубок, чем у закона сохранения импульса» [E4]. Я считаю, что это высказывание интересно как штрих к картине, описывающей состояние физики 50-летней давности, но далеко идущих выводов из него делать не следует.

Вернемся теперь к Бозе. Он подошел к определению Z^i не с точки зрения «числа частиц», а с точки зрения «числа ячеек». Видимо, это заставило его пойти дальше по пути Больцмана, но заменить всюду «частицы» «ячейками»; он никак не обосновал (да и не мог этого сделать) такой подход, который, тем не менее, давал верный результат. Чтобы понять, почему Бозе не знал, что его подход «отличается от того, который мог бы предложить сам Больцман на основе своей статистики», напомню о крупнозернистом подсчете Больцмана, который более подробно обсуждался в § 4.2.

Больцман. Распределим N частиц с полной энергией E по ячейкам фазового пространства одной частицы $\omega_1, \omega_2, \ldots$ В ω_A имеется N_A частиц; их средняя энергия равна E_A. Имеем

$$N = \sum_A N_A, \quad E = \sum_A E_A N_A. \tag{23.5}$$

Относительная вероятность W такого крупнозернистого состояния равна

$$W = N! \prod_A \left(\omega_A^{N_A}/N_A!\right). \tag{23.6}$$

В равновесии энтропия S задается выражением

$$S = k \ln W_{\max} + C, \tag{23.7}$$

где C — константа, $W_{\max}$ задается экстремальными условиями

$$\sum \delta N_A \left(\ln \omega_A - \ln N_A + \lambda - \beta^{-1} E_A\right) = 0, \tag{23.8}$$

включающими ограничения при фиксированном N и при фиксированной энергии E.

Бозе. Определим Z^i по p_r^i, где p_r^i определяется как число ячеек, содержащих r квантов с частотой ν^i. Пусть всего имеется N^i фотонов с такой частотой и их полная энергия равна E. Тогда

$$Z^i = \sum_r p_r^i, \tag{23.9}$$

$$N^i = \sum_r r p_r^i, \tag{23.10}$$

$$E = \sum_i N^i h\nu^i \tag{23.11}$$

и

$$N = \sum_i N^i \tag{23.12}$$

есть общее число фотонов. Далее Бозе использовал свой новый крупнозернистый подсчет:

$$W = \prod_s (Z^s!/p_0^s!\, p_1^s! \ldots). \qquad (23.13)$$

Затем он нашел максимум W как функции от p_r^s при фиксированных Z^s и E:

$$\sum_{s,r} \delta p_r^s (1 + \ln p_r^s + \lambda^s + \beta^{-1} rh\nu^s) = 0, \qquad (23.14)$$

после чего, использовав стандартную процедуру, получил закон Планка для $E(\nu, T)$ и на этом без всяких комментариев закончил свою статью.

Бозе считал свой подход, т. е. уравнение (23.13), «очевидным» [B3]. Ничто не может быть дальше от истины, чем это утверждение. Позволю себе высказать предположение, что Бозе считал подсчет ячеек [уравнение (23.13)] совершенно аналогичным больцмановскому подсчету частиц [уравнение (23.6)] и что ограничение на число Z^s было им наложено по полной аналогии с фиксированием в статистике Больцмана числа N. Кроме того, два лагранжевых параметра уравнения (23.14) представляют собой аналог соответствующих параметров уравнения (23.8). Из замены фиксированного N фиксированным Z^s следует, что число частиц N не сохраняется. На самом деле и это ограничение излишне: если его отбросить, то в уравнении (23.14) нужно исключить член λ^s. Но и тогда, как легко проверить, все равно получается закон Планка! Теперь хорошо известно, что закон Планка следует из статистики Бозе, когда *единственным* ограничением является фиксирование энергии E. Подводя итог, можно сказать, что Бозе своим выводом ввел три новых свойства:

1) число фотонов не сохраняется;

2) число ячеек разбиения P_r^s определяется числом частиц в ячейке; таким образом, отбрасывается аксиома различимости частиц, введенная Больцманом;

3) использование уравнения (23.13) предполагает статистическую независимость ячеек, т. е. больше нет статистической независимости частиц.

Поразительно, что Бозе оказался прав во всех трех случаях. (В своей статье он не прокомментировал ни одну из новых характеристик своей статистики.) Мне кажется, что со времени квантовой гипотезы Планка 1900 г. не было другого такого удачного выстрела наугад. Планк тоже проводил подсчет довольно странно, как об этом мельком упомянул Эйнштейн в написанной в 1924 г. рецензии на очередное издание книги Планка «Тепловое излучение»: «Вводимые при этом [в планковском законе излучения] постулаты [взаимодействия между материальными частицами и излучением] ввиду их простоты, с одной стороны, и аналогии с соответствующими соотношениями классической теории — с другой, по-видимому, можно считать в достаточной степени обоснованными» [E5].

Эйнштейн постоянно размышлял над работой Бозе. Выступая 4 октября 1924 г. в Люцерне перед Швейцарским обществом естествоиспытателей, он подчеркнул «особое значение для наших теоретических представлений» данного Бозе нового вывода уравнения (23.4) [E6]. К тому времени уже вышла в свет и его собственная работа, впервые посвященная квантовой статистике.

§ 23.3. Эйнштейн

В течение всей жизни Эйнштейн бился над проблемами квантовой физики. Что же касается его конструктивного вклада в эту область, то он воплотился в трех статьях, первая из которых была опубликована в сентябре 1924 г., а остальные две — в начале 1925 г. Как и в случае других крупных достижений Эйнштейна в квантовой теории, он получил новые результаты, используя статистические методы. Наиболее известным из них является открытие конденсации Бозе — Эйнштейна. Об этом и пойдет речь ниже. В следующих параграфах я расскажу о других результатах, полученных в этих работах, о результатах менее известных, хотя и более глубоких.

Прежде всего — несколько слов в качестве постскриптума к работе о световых квантах 1905 г.

Логику этой работы Эйнштейна можно схематически представить так:

$$1905\text{ г., Эйнштейн } \begin{cases}\text{Закон Вина}\\ \text{Аналогия с газом}\end{cases} \rightarrow \text{Световые кванты.}$$

Теперь можно вернуться к вопросу, поставленному в § 19.3. Известно, что статистика Бозе — Эйнштейна справедлива в том случае, когда излучение рассматривается как газ фотонов. Как же Эйнштейну удалось высказать оправдавшееся впоследствии предположение о существовании световых квантов, исходя из статистики Больцмана? Ответ: по статистике Бозе — Эйнштейна наиболее вероятное значение $\langle n_i\rangle$ для фотонов задается выражением $\langle n_i\rangle = [\exp(h\nu_i/kT) - 1]^{-1}$. Отсюда следует, что в режиме Вина, $h\nu_i \gg kT$, $\langle n_i\rangle \ll 1$. Следовательно, с точностью до не имеющего значения[2]) множителя $N!$ уравнения (23.2) и (23.3) в пределе Вина идентичны. Это асимптотическое соотношение, выполняющееся в области применимости закона Вина, задним числом полностью оправдывает революционный шаг, сделанный Эйнштейном в 1905 г.!

Бозе рассуждал следующим образом:

$$1924\text{ г., Бозе } \begin{cases}\text{Фотоны}\\ \text{Квантовая статистика}\end{cases} \rightarrow \text{Закон Планка.}$$

[2]) Значение множителя $N!$ несущественно, потому что он влияет в уравнении (23.7) только на константу C. Тем не менее, эта константа представляет определенный интерес. Например, она позволяет определить S как экстенсивную термодинамическую переменную. Подробно эта интересная история нормировки обсуждается М. Клейном [K1].

Эйнштейн вернул все «на круги своя»:

$$\text{1924 — 1925 гг., Эйнштейн} \quad \left\{\begin{array}{l}\text{Статистика Бозе}\\ \text{Аналогия с фотонами}\end{array}\right. \rightarrow \text{Квантовый газ.}$$

Можно сказать, что Эйнштейн неизбежно должен был сделать такой шаг: «...допуская, что излучение можно рассматривать как газ из квантов, мы обязаны признать, что аналогия между газом из квантов и газом из молекул должна быть полной» [E7].

В работе 1924 г. [E8] Эйнштейн воспользовался формулой подсчета Бозе [уравнение (23.13)], но внес в нее два изменения. Естественно, ему нужно было соответствующее выражение для Z^s, относящееся к нерелятивистским частицам с массой m:

$$\left.\begin{aligned} h^3 Z^s &= 2\pi V (2m)^{3/2} (E^s)^{1/2}\, dE^s,\\ 2mE^s &= (p^s)^2. \end{aligned}\right\} \tag{23.15}$$

В отличие от Бозе Эйнштейн должен был потребовать, чтобы число N было фиксированным. Это достигается введением члена

$$-r \ln A \tag{23.16}$$

в выражение в скобках уравнения (23.14)[3]). Одним из следствий модифицированного таким образом уравнения (23.14) является то, что лагранжев множитель $-\ln A$ определяется так:

$$N = \sum_s N^s = \sum_s \left[A^{-1} \exp\left(E^s/kT\right) - 1\right]^{-1}. \tag{23.17}$$

Следовательно, отметил Эйнштейн, «мера вырождения» газа должна удовлетворять соотношению

$$A \ll 1. \tag{23.18}$$

В своей первой статье [E8] Эйнштейн рассмотрел случай, когда A не достигает критического значения, равного единице. Далее он перешел к бесконечному пределу, т. е. заменил в уравнении (23.17) суммирование интегрированием по фазовому пространству, и получил для $A < 1$:

$$1/v = \varphi_{3/2}(A)/\lambda^3, \quad p/kT = \varphi_{5/2}(A)/\lambda^3, \quad \varphi_n(A) = \sum_{m=1}^{\infty} m^{-n} A^m, \tag{23.19}$$

где $v = V/N$. Далее он рассмотрел область $A \ll 1$, где уравнение состояния [получаемое путем исключения A в уравнениях (23.19)] приводит к значительным отклонениям от законов классического идеального газа. Все это добротная физика, хотя подход непривычно прямолинеен для такого человека, как Эйнштейн.

Вторую статью [E7], наиболее значительную из трех его работ, посвященных этой проблеме, Эйнштейн начал с рассмотре-

---

[3]) Член A^{-1} определяется как $\exp(-\mu/kT)$, где μ — химический потенциал. Эйнштейн, конечно, не вводил в выражение в скобках лишний член λ^s. При записи уравнений (23.16)—(23.22) я отклоняюсь от обозначений, использованных Эйнштейном.

ния связи между v и T при $A = 1$:

$$kT_0 = h^2/(2m[v_0\varphi_{3/2}(1)]^{2/2}), \qquad (23.20)$$

а затем поставил вопрос, что произойдет, если T станет ниже T_0 (при заданном v_0). Вот его ответ: «Я утверждаю, что в этом случае некоторое число молекул, все возрастающее с общей плотностью, переходит в первое квантовое состояние (с нулевой кинетической энергией), тогда как остальные молекулы распределяются соответственно параметру $A = 1$... Наступает разделение: одна часть „конденсируется", а оставшаяся образует „насыщенный идеальный газ"...» [E7].

Итак, Эйнштейн дал первое чисто статистическое обоснование наличия фазового перехода, который сейчас называют конденсацией Бозе — Эйнштейна. Несколько важных соображений по этому поводу я выскажу позже, а сейчас обратимся к рассмотрению других представляющих интерес аспектов трех статей Эйнштейна.

Эйнштейн о статистической зависимости. После публикации статьи Бозе [B3] и первой из работ Эйнштейна [E8] Эренфест и другие коллеги (читаем мы во второй статье Эйнштейна [E7]) возражали по поводу того, что «кванты и соответственно молекулы трактовались не как статистически взаимно независимые объекты, причем на это обстоятельство в наших статьях специально не указывалось» (имеются в виду работы [B3, E8]). «Это совершенно верно»,— ответил Эйнштейн [E7]. Далее он подчеркнул, что различие между подсчетом по Больцману и подсчетом по Бозе — Эйнштейну «косвенно выражает известную гипотезу о взаимном влиянии молекул пока совершенно загадочной природы...». Высказав это соображение, Эйнштейн вышел на рубеж квантовой механики систем тождественных частиц. Загадочное влияние оказывает, конечно, корреляция, требуемая полностью симметричными волновыми функциями.

Эйнштейн о неразличимости. Для того чтобы еще ярче проиллюстрировать различие между старым и новым методами подсчета микросостояний, Эйнштейн записал выражение для W иначе, чем в уравнении (23.13). Он подсчитал, сколькими способами N^s неотличимых друг от друга частиц из интервала dE^s можно распределить по Z^s ячейкам:

$$W = \prod_s (N^s + Z^s - 1)!/N^s!(Z^s - 1)!. \qquad (23.21)$$

Сейчас во всех учебниках приводится уравнение Эйнштейна (23.21), а не выражение (23.13), полученное Бозе.

Эйнштейн о третьем законе термодинамики. Как отмечалось в конце § 20.3, в 1914 г. Нернст предположил, что третий закон термодинамики применим к газам. Там же упоминалось, что в то время не было известно ни одной модели газа с соответствующими свойствами. В 1925 г. Эйнштейн внес последний вклад в термодинамику, указав, что газ Бозе — Эйн-

штейна удовлетворяет третьему закону (в отличие от газа Больцмана, как отметил Эйнштейн). Действительно, так как при $T \to 0$ все частицы переходят в состояние с нулевой энергией, $N^0 = N$, а $N^* = 0$. Следовательно, при $T \to 0$ имеем $W \to 1$, а $S \to 0$. Эйнштейну было так же важно установить, что молекулярный газ Бозе — Эйнштейна приводит к закону Нернста, как и определить, что фотонный газ Бозе — Эйнштейна приводит к закону Планка.

Эйнштейн и несохранение числа фотонов. После 1917 г. Эйнштейн не писал больше научных статей, посвященных проблеме излучения[4]). Единственное упоминание об излучении в статьях 1924—1925 гг. встречается в работе [E11], где он пишет: «...примененный Бозе и мной статистический метод ни в коей мере не является бесспорным, но кажется обоснованным лишь апостериори, благодаря успеху в случае излучения...».

Нет никаких сомнений в том, что Эйнштейн обратил внимание на факт несохранения числа фотонов. Если воспользоваться его обозначениями, то это вытекает из приравнивания единице A в уравнении (23.16). Тем не менее, я не нашел никаких упоминаний о несохранении числа фотонов, ни в его научных трудах, ни в доступной мне переписке. Не знаю, почему он решил хранить молчание по этому вопросу и по прочим проблемам, возникавшим позднее в связи с фотонами. Мне кажется вполне правдоподобным предположение о том, что он просто ждал того времени, когда сможет сказать что-то фундаментальное о фотонах, разобравшись предварительно с проблемой причинности, на которую он обратил внимание еще в 1917 г. Это время так никогда и не наступило.

Другие физики с интересом следили за работами Эйнштейна в области квантовой статистики. Лоренц предложил Эйнштейну выступить с докладом на эту тему на Сольвеевском конгрессе 1927 г. Ответ Эйнштейна, написанный в июне 1927 г., вполне может служить предисловием к рассказу о следующем этапе развития квантовой механики: «Я помню, что пообещал Вам выступить с докладом о квантовой статистике на Сольвеевском конгрессе. После долгих размышлений и колебаний я пришел к убеждению, что недостаточно компетентен для того, чтобы прочитать доклад, который отражал бы нынешнее положение вещей. Это связано с тем, что я не мог активно участвовать в современном развитии квантовой теории, а это необходимо для подготовки доклада. Частично это объясняется тем, что я не очень способен к восприятию происходящих бурных изменений, а частично тем, что я не одобряю чисто статистический подход, на котором базируются новые теории... До последнего времени я надеялся со-

[4]) Не считая опровержения возражений, выдвинутых против его работы об остронаправленном излучении [E9]. В 1930 г. Эйнштейн заявил, что вскоре опубликует новую статью о флуктуациях излучения [E10], однако она так и не вышла в свет.

обцить что-либо ценное в Брюсселе; сейчас я полностью утратил эту надежду. Прошу Вас не сердиться на меня; не считайте, что я отнесся к поручению легкомысленно, напротив, я старался изо всех сил... Наверное, Э. Ферми из Болоньи... или Ланжевен ... сделают это лучше» [E12].

§ 23.4. Послесловие к конденсации Бозе — Эйнштейна

1. В ноябре 1924 г. Эйнштейн писал Эренфесту: «Начиная с определенной температуры, молекулы „конденсируются“ без притяжения, т. е. накапливаются при скорости, равной нулю. Теория красива, но есть ли в ней доля истины?» [E13].

2. В 1925 г. Эйнштейн указал, что конденсация может наблюдаться у водорода, гелия и газа электронов [E7]. В 1925 г. эти предположения выглядели, конечно, вполне разумно. Вспомним, что статистика Ферми — Дирака была предложена[5]) лишь в 1926 г. [F1, D1], после того как в 1925 г. Паули установил принцип запрета [P2]. Но все равно потребовалось время для того, чтобы установить, в каких случаях применяется статистика Бозе — Эйнштейна, а в каких — Ферми — Дирака: в декабре 1926 г. Паули писал о работе Дирака [D1]: «Следуя Дираку, мы также будем считать, что к газу материальных частиц применяется статистика Ферми, а не Бозе — Эйнштейна» [P3]. Окончательной ясности в этом вопросе удалось добиться в 1927 г.

3. В работе 1925 г. Эйнштейн не назвал явление конденсации фазовым переходом. По словам Уленбека (частное сообщение), в 1925 г. никто не представлял себе, что наличие фазового перехода вызывает большие проблемы. В 1926 г. тот же Уленбек высказал возражения против подхода Эйнштейна к проблеме конденсации [U1], в результате чего удалось более точно теоретически сформулировать те условия, при которых могут происходить фазовые переходы. Уленбек указал, что при $A \to 1$ (и фиксированном значении T) параметр N^0 в уравнении (23.17) стремится к бесконечности; следовательно, N также стремится к бесконечности. Таким образом, если $A \to 1$, то невозможно удовлетворить требованию о том, чтобы N оставалось фиксированным конечным числом; поэтому условие $A = 1$ выполняется лишь асимптотически, и нет такого режима, при котором сосуществуют две фазы.

Недавно Уленбек рассказал о том обмене мнениями, который происходил по этому вопросу между Эренфестом и Эйнштейном [U2]. Однако правы были оба — и Уленбек, и Эйнштейн. Суть состоит в том, что фазовый переход при строго определенной температуре может происходить только в так называемом термодинамическом пределе: $N \to \infty$, $V \to \infty$, v фиксировано. К такой точке зрения удалось прийти в ходе длившейся все утро дискуссии на проходившей в ноябре 1937 г. конференции, по-

[5]) В работе [D2] Дирак прекрасно рассказал о последовательности событий, которые привели к этому открытию.

священной 100-летию со дня рождения Ван-дер-Ваальса. Вопрос стоял так: содержит ли функция распределения информацию, которая необходима для описания фазового перехода, происходящего при строго определенной температуре? Существование перехода предполагает наличие аналитически различающихся выражений для отрезков изотерм. Оставалось непонятным, как быть. Дискуссия закончилась ничем, и председательствовавший на конференции Крамерс поставил вопрос на голосование. Уленбек вспоминает, что голоса «за» и «против» распределились примерно поровну. В конце концов все же было признано, что правильным ответом является предложение Крамерса о переходе к термодинамическому пределу. Вскоре после этого в статье, написанной совместно с его одаренным студентом, покойным Борисом Каном (он пал жертвой нацистов), Уленбек снял свои возражения по поводу результата, полученного Эйнштейном [K2].

4. До 1938 г. конденсация Бозе — Эйнштейна «имела репутацию чисто воображаемого явления» [L1]. Напомню, что фазовый переход He I — He II был обнаружен Виллемом Хендриком Кеезомом лишь в 1928 г. [K3]. В 1938 г. Фриц Лондон предложил толковать этот фазовый переход в гелии как конденсацию Бозе — Эйнштейна. Эксперимент дал температуру точки перехода 2,19 К. То, что из уравнения (23.20) следует температура перехода 3,1 К, внушает большие надежды [L2]. Принято считать (хотя пока и бездоказательно), что различие между этими двумя значениями вызвано пренебрежением в теоретических выкладках влиянием межмолекулярных сил.

Глава 24. ЭЙНШТЕЙН В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД: РОЖДЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

Расстанемся со «старой» квантовой теорией и перейдем к рассмотрению переходного периода — того времени, когда волны материи обсуждались лишь крохотной группкой физиков, а механика волн материи еще не была создана. Этот период начался в сентябре 1923 г., когда в трудах Французской академии наук были напечатаны два кратких сообщения Луи де Бройля [B1, B2], а закончился в январе 1926 г. с опубликованием первой работы Шрёдингера о волновой механике [S1]. Мне хотелось подчеркнуть решающую роль Эйнштейна в этих событиях, рассказать о том, как его работы повлияли на де Бройля, а работы де Бройля повлияли на него, и в заключение указать, как работы обоих этих ученых, в свою очередь, повлияли на Шрёдингера.

К другому имевшему фундаментальное значение событию, предшествовавшему созданию Шрёдингером волновой механики,— предложению Гейзенбергом матричной механики [H1] — Эйнштейн не имел ни прямого, ни косвенного отношения; поэтому в данной книге я не буду подробно рассматривать важные результаты, полученные Гейзенбергом.

§ 24.1. От Эйнштейна к де Бройлю

В тот период, который начался работой Эйнштейна об остронаправленном излучении (1917), а закончился статьями Дебая и Комптона об эффекте Комптона (1923), проблемой фотонов занимались еще несколько теоретиков, однако влияние на физику оказали работы только одного [1]) из них — Луи де Бройля.

Де Бройль получил образование еще до первой мировой войны. В 1919 г., отслужив несколько лет во французской армии, он пришел в физическую лабораторию, которой руководил его брат Морис и в которой в основном исследовались проблемы фотоэффекта в рентгеновском диапазоне и рентгеновской спектроскопии. Таким образом, он постоянно сталкивался с вопросами природы электромагнитного излучения и написал на эту тему несколько статей. В одной из них [B6] де Бройль независимо от Бозе (и раньше него) получил результаты, относящиеся к оценке плотности состояний излучения, рассматриваемого как совокупность частиц (фотонов). Это было в октябре 1923 г., через месяц после того, как он же предложил открывающий новую эпоху в физике принцип, согласно которому корпускулярно-волновой дуализм должен относиться не только к излучению, но и к веществу. «После долгих размышлений и раздумий я внезапно понял в 1923 г., что открытие, сделанное Эйнштейном в 1905 г., следует обобщить и распространить на все материальные частицы, в частности электроны» [B7].

Де Бройль сделал этот гигантский шаг в статье от 10 сентября 1923 г. [B1]: выражение $E = h\nu$ должно быть справедливо не только для фотонов, но и для электронов, которым он приписал «фиктивную сопряженную волну». В статье от 24 сентября [B2] он указал направление, на котором следует «искать экспериментального подтверждения наших идей»: поток электронов, проходящий через отверстие, размер которого мал по сравнению с длиной волны, соответствующей электрону, «должен давать дифракционную картину».

Обсуждение других важных аспектов работ де Бройля выходит за рамки данной книги (более подробно о них можно прочитать, например, в [K1]). Упоминавшиеся выше статьи легли в основу докторской диссертации де Бройля [B7], которую он защищал 25 ноября 1924 г. Эйнштейн получил экземпляр этой диссертации от Ланжевена, одного из оппонентов на защите де Бройля. Из письма, написанного Эйнштейном Лоренцу в декабре того же года, видно, что результаты де Бройля произвели на него большое впечатление и что он нашел идеям де Бройля новое применение: «Младший брат... де Бройля предпринял очень интересную попытку интерпретации квантовых правил Бора —

---

[1]) Мне известно, что над этими проблемами работали также Бриллюэн [B3], Вольфке [W1], Боте [B4], Бейтман [B5] и Орнштейн и Цернике [O1].

Зоммерфельда (в диссертации, защищенной в Париже в 1924 г.). Мне кажется, что это первый робкий луч света, пролитый на самую темную из физических загадок. Я тоже обнаружил кое-что, свидетельствующее в пользу его построений» [E1].

§ 24.2. От де Бройля к Эйнштейну

В 1909 и 1917 гг. Эйнштейн добился значительных результатов в исследовании проблемы излучения, изучая флуктуации относительно состояния теплового равновесия. Излишне поэтому упоминать, что в 1924 г., когда он вновь занялся молекулярным квантовым газом, он прежде всего рассмотрел флуктуации.

Чтобы лучше понять, *что* Эйнштейн сделал на этот раз, стоит вернуться к уравнению (21.5) для среднего квадратического значения энергии флуктуаций электромагнитного излучения

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = (h\nu\rho + (c^3/8\pi\nu^2)\rho^2)\, V d\nu. \qquad (24.1)$$

Положим $V\rho d\nu = n(\nu)h\nu$ и $\langle \varepsilon^2 \rangle = \Delta(\nu)^2 (h\nu)^2$. Член $n(\nu)$ можно истолковать как среднее число квантов в интервале энергий $d\nu$, а $\Delta(\nu)^2$ — как среднее квадратическое значение флуктуаций для данного числа квантов. Теперь уравнение (24.1) можно записать в виде

$$\Delta(\nu)^2 = n(\nu) + n(\nu)^2/Z(\nu), \qquad (24.2)$$

где $Z(\nu)$ — число состояний на интервал $d\nu$, задаваемое уравнением (23.4). В статье от 8 января 1925 г. Эйнштейн показал, что уравнение (24.2) выполняется и для его квантового газа в том случае, если ν задается из соотношения $E = h\nu = p^2/2m$, а для определения числа состояний вместо уравнения (23.4) используется уравнение (23.15) [E2].

Рассматривая проблему излучения в 1909 г., Эйнштейн увидел, что второй член уравнения (24.1) — это знакомый волновой член, а первый член — неизвестное ранее выражение, соответствующее частицам. Рассматривая вновь в 1924 г. проблемы флуктуаций применительно к квантовому газу, он отметил, что роли переменились. Первый член, некогда неизвестный в теории излучения, оказался теперь давно знакомым членом, описывающим флуктуации в распределении Пуассона для (различимых) частиц. Но как же быть со вторым членом, которым учитывается взаимная неразличимость частиц, в случае газа? Так как в теории излучения этот член соответствовал волнам, Эйнштейн сделал вывод, что ему «можно придать соответствующий смысл и в газе, сопоставляя газу некоторый процесс излучения...» [E2]. И добавил: «Я рассмотрю это толкование подробнее, так как думаю, что здесь речь идет не только о простой аналогии».

Но что же это за волны? И тут Эйнштейн обратился к диссертации де Бройля [B7], «работе, заслуживающей всяческого внимания». Он высказал предположение о том, что газу должно быть поставлено в соответствие волновое поле деброй-

левского типа, я констатировал, что такое предположение позволило ему интерпретировать второй член уравнения (24.2). Как и де Бройль, Эйнштейн указал, что молекулярный пучок должен давать дифракционную картину, но добавил, что при обычно используемых отверстиях наблюдать этот эффект было бы исключительно трудно. Он также отметил, что волновое поле де Бройля должно быть скалярным [выше отмечалось, что коэффициент поляризации в уравнении (23.4) равен 2, а в уравнении (23.15) — 1!].

То, что к постулированию существования волн материи Эйнштейн пришел на основе анализа флуктуаций, является одним из его крупных достижений. Можно только предполагать, как выглядела бы история физики XX в., если бы Эйнштейн продолжил эту аналогию чуть дальше, однако приведенными независимыми аргументами в пользу корпускулярно-волнового дуализма закончился 20-летний период максимальной творческой активности Эйнштейна — период, равного которому, видимо, не было в истории.

Постскриптум, лето 1978 г. При подготовке этой главы я натолкнулся на воспоминания Паули, где он упомянул об одном из высказываний Эйнштейна на физической конференции, проходившей в Инсбруке в 1924 г. По словам Паули, на этой конференции Эйнштейн предложил «искать явления дифракции и интерференции в молекулярных пучках» [P1]. Мне удалось установить, что конференция проходила с 21 по 27 сентября. Это заинтересовало меня — оказывалось, что Эйнштейн пришел к идее о корпускулярно-волновом дуализме вещества другим путем, независимо от де Бройля. Де Бройль защищал диссертацию в ноябре. Если Паули не подвела память, то значит Эйнштейн сделал свое замечание за два месяца до защиты де Бройля. Мог ли он установить волновые свойства вещества независимо? Все-таки он размышлял над свойствами молекулярного газа с июля... Возникает вопрос: когда Эйнштейн познакомился с работой де Бройля? В частности, когда он получил от Ланжевена диссертацию де Бройля? Естественно, было очень интересно узнать, что может сказать по этому поводу сам профессор де Бройль. Я написал ему и получил любезный ответ, который и процитирую здесь с разрешения автора.

Де Бройль считает, что Эйнштейн не знал о его трех кратких сообщениях [B1, B2, B3], написанных в 1923 г. «Тем не менее, так как Эйнштейн получал журнал "Comptes Rendus" и очень хорошо владел французским, он вполне мог их заметить» [B8]. Де Бройль также упоминает, что он передал Ланжевену первый отпечатанный экземпляр диссертации в начале 1924 г. «Я убежден, что Эйнштейн был знаком с моей диссертацией с весны 1924 г.» [B9]. Вот как было дело. «Когда в 1923 г. я написал диссертацию, которую собирался представить для получения докторской степени, у меня было три машинописных экземпляра этой работы. Один из них я передал П. Ланжевену,

чтобы он решил, может ли моя работа считаться диссертационной. П. Ланжевен, видимо, несколько удивленный новизной моих идей, попросил у меня второй машинописный экземпляр для передачи Эйнштейну. Именно тогда, прочитав мою работу, Эйнштейн сказал, что мои идеи кажутся ему представляющими определенный интерес. После этого Ланжевен решил принять мою работу» [B8].

Итак, Эйнштейн был не только одним из трех «отцов» квантовой теории, но и единственным «крестным отцом» волновой механики.

§ 24.3. От де Бройля и Эйнштейна к Шрёдингеру

В конце 1925 г. Шрёдингер закончил работу, озаглавленную «К теории газа Эйнштейна» [S2]. Она предшествовала созданию волновой механики, и ее понимание совершенно необходимо для того, чтобы осознать, как Шрёдингер сделал свое открытие [K2].

Прежде чем заняться подходом Шрёдингера, вспомним, как Дебай получил в 1910 г. формулу Планка [D1]. Рассмотрим полость, заполненную излучающими осцилляторами, которые находятся в тепловом равновесии. Спектральная плотность равна $8\pi\nu^2\varepsilon(\nu, T)/c^3$, где ε — равновесная энергия поля излучения осциллятора, имеющего частоту ν. Дебай ввел квантовое правило, в соответствии с которым допустимая энергия осциллятора может принимать значения только $nh\nu$, $n = 0, 1, 2, \ldots$ В равновесии n-й энергетический уровень подвергается взвешиванию вместе с больцмановским экспоненциальным множителем. Отсюда $\varepsilon = \sum nh\nu y^n / \sum y^n$, $y = \exp(-h\nu/kT)$, что дает закон Планка [2]).

Вернемся теперь к Шрёдингеру. По его собственному признанию, ему не очень нравилась статистика Бозе — Эйнштейна [S2]. Поэтому он поставил вопрос: нельзя ли избежать применения этой новой статистики, рассмотрев молекулярный газ Эйнштейна с применением метода Дебая? Иначе говоря, почему бы не начать с волнового представления газа, а затем наложить на него условия квантования «а ля Дебай»? После этого следует ключевая фраза статьи: «Это означает не что иное, как необходимость серьезно отнестись к предложенной де Бройлем и Эйнштейном волновой теории движущихся частиц» [S2]. Именно так и поступил Шрёдингер. Здесь нет необходимости более подробно обсуждать эту статью, полученную редакцией 25 декабря 1925 г.

Следующая статья Шрёдингера была представлена в печать 27 января 1926 г. [S1]. В ней он предложил уравнение для атома водорода. Так родилась волновая механика. В этой работе

---

[2]) Этот вывод отличается от вывода Планка тем, что последний квантовал вещественные, а не излучательные осцилляторы. От вывода Бозе для фотонного газа он отличается тем, что здесь энергия $nh\nu$ толкуется как n-е состояние одиночного осциллятора, а не как состояние n частиц, имеющих энергию $h\nu$ (такой подход использовался нами в гл. 23).

Шрёдингер выразил признательность де Бройлю и Эйнштейну: «Я недавно показал [S2], что теория газа Эйнштейна может основываться на рассмотрении стоячих волн, подчиняющихся закону дисперсии де Бройля... Изложенные выше представления можно считать обобщением их представлений».

В апреле 1926 г. Шрёдингер еще раз признал, что на него оказали большое влияние идеи де Бройля и «краткие, но бесконечно дальновидные замечания Эйнштейна» [S3].

Глава 25. ОТКЛИК ЭЙНШТЕЙНА НА НОВУЮ ДИНАМИКУ

Все, кто знаком с современной физикой, знают, что Эйнштейн весьма скептически относился к квантовой механике. Все биографы Эйнштейна приводят его поговорку о том, что «Бог не играет в кости». Действительно, я слышал, как он произносил такую фразу, а иногда высказывался даже сильнее, например: «Трудно заглянуть в карты господа бога. Но я ни на секунду не верю, что он бросает кости и прибегает к „телепатии“ (как то следует из квантовой теории в ее теперешнем виде)» [E1]. Однако эти высказывания не должны создавать впечатления, что Эйнштейн перестал активно интересоваться проблемами квантовой физики и углубился в единую теорию поля. Ничего подобного. На самом деле, как мы увидим в гл. 26, даже занимаясь построением единой теории, он постоянно размышлял над загадками квантов. В этой главе я расскажу о том, как постепенно изменялось отношение Эйнштейна к квантовой механике. В определенной мере об этом можно судить по его последним научным работам, но более отчетливо изменение его отношения к квантовой механике прослеживается в автобиографических заметках и в переписке Эйнштейна. Разобраться в его взглядах мне в значительной степени помогли беседы с ним самим.

Обратимся вначале к периоду 1925—1931 гг., когда Эйнштейна больше всего беспокоил вопрос о том, не противоречива ли квантовая механика.

§ 25.1. 1925—1931 гг.: начало спора

Шрёдингер был не единственным, кто смог с пользой применить результаты, полученные Эйнштейном в его трех статьях о новой теории газа. За полгода до публикации первой статьи Шрёдингера о волновой механике Вальтер Эльзассер, также признавший стимулирующее влияние работ Эйнштейна, отметил, что медленные электроны идеально подходят для проверки «предположения [Эйнштейна], согласно которому каждому поступательному движению частицы должно сопутствовать волновое поле, определяющее кинематику частицы» [E2]. Он также указал, что экспериментальные результаты, полученные Рамзауэром, Дэвиссоном, Кансменом и другими, видимо, подтверждают существо-

вание дифракции и интерференции волн материи. Гейзенберг писал Паули, что, ознакомившись с работами Эйнштейна, он загорелся идеями Эльзассера [H1].

Эйнштейн и сам продолжал размышлять над старым и новым смыслом волновых полей. Юджин Вигнер, побывавший в Берлине в 1925 г., рассказал мне, что у Эйнштейна в то время возникла идея рассматривать волновое поле как «ведущее поле» световых квантов и других частиц, так чтобы на каждую частицу приходилось одно поле. «Эйнштейн, хотя ему и нравилась эта идея, так и не опубликовал ее» [W1], поскольку приписывание одного поля каждой частице несовместимо со строгим выполнением закона сохранения энергии-импульса; эта трудность была преодолена, когда Шрёдингер ввел одно ведущее поле — свою волновую функцию — для систем частиц.

Ранее уже упоминалось, что Эйнштейн рассматривал свою работу по квантовому газу как временное отклонение от основных исследований. В тот ранний период развития квантовой механики [1]) он «напряженно работал над дальнейшей разработкой теории, которая связала бы тяготение с электричеством» [E3]. Тем не менее, от Эйнштейна не ускользнула важность новых открытий, сделанных в квантовой теории. Бозе, побывавший в Берлине в ноябре 1925 г., вспоминал: «...Эйнштейн был очень взволнован новыми достижениями квантовой механики. Он хотел, чтобы я прикинул, как могут выглядеть статистика световых квантов и определение вероятности излучательных переходов в новой теории» [M1]. Но не Бозе, а Дирак ответил на этот вопрос, дав динамический вывод выражений для коэффициентов A и B в работе, заложившей основы квантовой электродинамики [D1]. Эйнштейну статья Дирака чрезвычайно не понравилась. В 1926 г. он писал Эренфесту: «Меня смущают идеи Дирака. Это балансирование на зыбкой грани, отделяющей гений от безумия, просто ужасно» [E4]; через несколько дней он писал тому же адресату: «Я вообще не понимаю Дирака (эффект Комптона)» [E5]. Однако через несколько лет он высоко отозвался о Дираке: «...мы, по моему мнению, должны быть признательны [Дираку] за логически наиболее совершенное изложение [квантовой механики]» [E6].

Но обратимся вновь к событиям осени 1925 г. Серьезный интерес Эйнштейна к квантовой механике заставил его написать Гейзенбергу вскоре после публикации статьи [H2] [2]). Все письма Эйнштейна Гейзенбергу утрачены, однако уцелело несколько писем Гейзенберга Эйнштейну. Одно из них (датированное 30 ноября 1925 г.) является, очевидно, ответом Эйнштейну в

---

[1]) Напомню, что первая статья Гейзенберга по этой теме была закончена в июле 1925 г., Шрёдингера — в январе 1926 г.

[2]) Впервые ученые встретились весной 1926 г. В статье [H3] Гейзенберг предпринял попытку воссоздать по памяти суть их ранних дискуссий.

связи с комментариями по поводу новой квантовой механики. Особенно интересно одно из замечаний Гейзенберга: «Вы, видимо, правы в том, что наш подход к квантовой механике более соответствует позиции Бора — Крамерса — Слэтера, но в ней [в теории БКС] рассматривается, по сути, лишь одна сторона процесса излучения. Другой аспект — это Ваша теория световых квантов, и мы надеемся, что справедливость законов сохранения энергии и импульса в нашей квантовой механике позволит в будущем связать ее с Вашей теорией» [H4]. По-моему, весьма примечательно, что Эйнштейну показалось, будто существует связь между теорией БКС и квантовой механикой. На самом деле никакой связи между ними, конечно, нет, хотя, как мы видели, предложение БКС имеет некоторые статистические черты [3]). Может быть, еще в 1925 г. Эйнштейн понял, что квантовомеханическое описание неизбежно будет иметь статистический характер.

Несколько месяцев Эйнштейн колебался в оценке теории Гейзенберга. В декабре 1925 г. он высказывал сомнения [E7], а в марте 1926 г. написал супругам Борн: «Концепции Гейзенберга — Борна привели нас всех в восторг и произвели глубокое впечатление на всех теоретиков, а мы, неповоротливые тугодумы, вместо тупого смирения ощущаем теперь сильное волнение» [E8]. Через месяц, поздравляя Шрёдингера с новым достижением [E9], он вновь заявил, что подход Гейзенберга — Борна бьет мимо цели. Учитывая общность работ Шрёдингера и Эйнштейна, неудивительно, что Эйнштейн воспринял волновую механику с неподдельным энтузиазмом: «Шрёдингер опубликовал пару прекрасных работ о квантовых правилах»,— писал он в мае 1926 г. [E10]. Это был его последний одобрительный отзыв о квантовой механике.

После этого пути разошлись.

Прошел почти год после публикации статьи Гейзенберга, прежде чем в концептуальные основы квантовой механики были внесены первые уточнения. Начало этому процессу положило высказанное Борном в июне 1926 г. соображение о том, что квадрат модуля волновой функции Шрёдингера следует толковать как плотность вероятности. В краткой фундаментальной статье Борн затронул самую суть проблемы детерминизма. Вот что он писал по поводу атомных столкновений: «Нельзя получить ответ на вопрос, какое состояние имеет место после столкновения. Можно ответить только на вопрос, насколько вероятно данное следствие столкновения... С точки зрения рассматриваемой нами квантовой механики нет такого параметра, который позволял бы причинно увязать следствие столкновения с каким-

---

[3]) Гейзенберг позднее заметил, что «трактовка Бора, Крамерса и Слэтера, тем не менее, содержала некоторые очень важные черты корректной интерпретации [квантовой механики]» [H5]. Я не разделяю этого мнения, но не буду добавлять чего-либо к тому, что уже было сказано в гл. 22.

либо индивидуальным событием. Следует ли надеяться, что можно будет установить такие свойства позднее... и определить их для индивидуальных событий?.. Я лично склоняюсь к тому, чтобы отказаться от детерминизма в атомных процессах, но это уже философский вопрос, где одни лишь физические аргументы ничего не решают» [B1].

Через месяц Борн написал пространное продолжение этой статьи, в котором отметил, что исходным пунктом его рассуждений явилось «...замечание Эйнштейна о взаимосвязи между волновым полем и световыми квантами; он [Эйнштейн] сказал примерно следующее: эти поля нужны лишь для того, чтобы указывать путь корпускулярным световым квантам, это своего рода „поле-призрак"» [B2]. Очевидно, здесь речь идет об идее «ведущего поля», предложенной Эйнштейном. Вскоре Борн писал Эйнштейну: «Моя мысль применить к волновому полю Шрёдингера Вашу идею „поля-призрака" оказалась весьма плодотворной... Поле вероятности распространяется, конечно, не в обычном, а в фазовом пространстве (или в конфигурационном пространстве)» [B3] [4]).

И вновь (но уже в последний раз) мы видим, что Эйнштейн играл важную роль в период рождения квантовой механики.

Статьи Борна первоначально были встречены по-разному Оказалось, что многим ведущим физикам, и среди них Шрёдингеру, трудно, почти невозможно, согласиться с отказом от причинности в классическом ее понимании. Бор неоднократно в беседах со мной повторял слова Шрёдингера о том, что тот, возможно, не опубликовал бы своих работ, если бы мог предвидеть, к каким последствиям все это приведет [5]). Позицию Эйнштейна можно резюмировать следующим образом: он возражал буквально против каждого утверждения, содержавшегося в статьях Борна и в его письме, направленном Эйнштейну чуть позже. Впервые, насколько мне известно, он выразил свое несогласие в декабре 1926 г., отвечая на одно из писем Борна: «Квантовая механика производит очень сильное впечатление. Но внутренний голос говорит мне, что это все не то. Из этой теории удается извлечь довольно много, но она вряд ли подводит нас к разгадке секретов всевышнего. Я, во всяком случае, полностью убежден, что Он не играет в кости. Волны в $3n$-мерном пространстве, скорость которых определяется потенциальной энергией (например, резиновые ленты)...» [E11].

Борн воспринял «...вердикт Эйнштейна... как тяжелый удар» [B4]. У многих других реакция Эйнштейна также вызвала тяжелое чувство; у некоторых возникло ощущение, что их в са-

---

[4]) Это важное письмо не вошло в опубликованную переписку Борна с Эйнштейном. Мое внимание на него обратил Джон Стэчел, которому я выражаю за это благодарность.

[5]) Шрёдингер высказывал оговорки по поводу интерпретации квантовой механики до конца жизни [S1].

мый разгар сражения покинул обожаемый вождь. Так, Гаудсмит рассказал мне о своем разговоре с Эренфестом, который состоялся (насколько он помнит [G1]) в середине 1927 г. Эренфест со слезами на глазах говорил, что ему пришлось делать выбор между позициями Бора и Эйнштейна, и он не мог не принять сторону Бора. Очевидно, что взгляды Эйнштейна оказывали большее влияние на старшее поколение, чем на молодое.

Из многих важных событий, происшедших в 1927 г., нам особенно важно отметить следующие четыре.

1927 г., февраль. В изложении доклада, прочитанного Эйнштейном в Берлине, читаем: «Природа не требует от нас выбора между квантовой и волновой теорией, а требует только синтеза обеих теорий, что физиками пока еще не достигнуто» [E12]. Сейчас, когда мы переходим к рассмотрению вклада других ученых, необходимо вновь напомнить, что еще в 1909 г. Эйнштейн первым подчеркнул важность учета корпускулярно-волнового дуализма при построении основ физической теории (см. § 21.1).

1927 г., март. Гейзенберг предложил принцип неопределенности [H6]. (В этой работе он также упомянул об обсуждавшейся Эйнштейном «взаимосвязи между волнами и световыми квантами».) В июне 1927 г. Гейзенберг написал Эйнштейну письмо, которое начинается так: «Сердечно благодарю Вас за любезное письмо; хотя, по сути, не могу сообщить ничего нового, я хотел бы, тем не менее, еще раз пояснить, почему считаю, что индетерминизм, т. е. отсутствие строгой причинности, не только логически допустим, но и *необходим*» [H7]. Это письмо является, видимо, ответом на утраченное письмо Эйнштейна, которое он скорее всего написал по поводу мартовской статьи Гейзенберга. Я еще вернусь к этому важному письму Гейзенберга в гл. 26. Здесь я упоминаю о нем только для того, чтобы еще раз подчеркнуть, что Эйнштейн отнюдь не относился ко всем этим новым результатам как сторонний наблюдатель. Более того, как раз в это время он сам (насколько мне известно, впервые) приступил к рассмотрению проблем квантовой механики. «Полностью или только статистически определяет волновая механика Шрёдингера движение системы?»[6]),— спрашивал Эйнштейн. Гейзенберг косвенным путем узнал, что Эйнштейн «написал статью, в которой утверждал, будто должен быть более точный, чем предложенный мной, способ определения орбит частиц». Гейзенберг просил более подробных сведений, «в особенности потому, что очень много думал над этими вопросами и поверил в соотношение неопределенностей только из-за угрызений совести, хотя те-

---

[6]) Таков заголовок статьи, представленной Эйнштейном к заседанию Прусской академии наук 5 мая 1927 г. Из протоколов видно, что статья находилась в наборе, когда Эйнштейн телефонным звонком попросил не печатать ее. Неопубликованная рукопись хранится в архиве Эйнштейна. См. также [K1, т. 2, с. 268].

перь уверен в нем полностью» [H8]. Эйнштейн в конце концов отказался от публикации этой работы.

1927 г., 16 сентября. На проходившей в Комо конференции, посвященной памяти Вольта (Эйнштейн был приглашен на нее, но не приехал), Бор впервые изложил принцип дополнительности: «Сама природа квантовой теории... заставляет нас рассматривать определенность положения в пространстве-времени и требование причинности, соединение которых характеризует классические теории как дополнительные, но взаимоисключающие черты нашего описания, символизирующие идеализацию соответственно наблюдения и определения» [B5].

1927 г., октябрь. На пятый Сольвеевский конгресс съехались все основоположники квантовой теории: Планк, Эйнштейн, Бор, де Бройль, Гейзенберг, Шрёдингер и Дирак. Во время заседаний «Эйнштейн почти ничего не говорил и лишь изредка высказывал простейшие возражения против вероятностного толкования... После этого он вновь умолкал» [B5a]. Как уже отмечалось в гл. 23, Эйнштейн отклонил предложение выступить на этом конгрессе с докладом о квантовой статистике.

Однако дискуссии проходили не только на официальных заседаниях. Все участники жили в одной гостинице, и там, в столовой, Эйнштейн был гораздо оживленней. Вот что рассказал Отто Штерн, присутствовавший на конгрессе [7]): «Эйнштейн во время завтрака высказывал возражения по поводу новой квантовой теории, изобретая красивые эксперименты, из которых было ясно, что [эта теория] не работает... Паули и Гейзенберг не обращали на это особого внимания и отделывались фразами типа „все будет в порядке, все образуется". Бор же слушал очень внимательно и вечером, за ужином, когда все собирались вместе, подробно разъяснял в чем дело». Так начался великий спор Бора с Эйнштейном. С течением времени оба ученых уточняли и оттачивали свои аргументы, но так никогда и не смогли договориться. В период с 1925 по 1931 г. единственным возражением, опубликованным Эйнштейном в научной литературе, было возражение, высказанное им в 1927 г. на Сольвеевском конгрессе [E13]. Имеется, однако, мастерское изложение диалога Бор — Эйнштейн тех лет, опубликованное Бором в 1949 г. [B6, с. 199]. Я уже писал о той значительной роли, которую сыграли дискуссии с Эйнштейном в жизни Бора [P1].

В протоколах Сольвеевского конгресса реакция на замечания Эйнштейна упоминается лишь мельком. Более подробно она анализируется в вышедшей позднее статье Бора. Рассмотрим теперь, в чем, по существу, заключались возражения Эйнштейна.

Вступительная фраза из выступления Эйнштейна говорит о нем больше, чем иная книга: «Я должен принести извинения,

---

[7]) Он рассказал это в беседе с Ресом Постом, записанной на пленку 2 декабря 1961 г. Выражаю глубокую благодарность Р. Посту за разрешение использовать часть стенограммы этой беседы.

что выступаю в дискуссии, не постигнув достаточно глубоко квантовую механику» [E13].

Далее он рассмотрел эксперимент, в котором пучок электронов падает на экран, имеющий небольшое отверстие. Прошедшие через него электроны дают на втором экране дифракционную картину. Возникает вопрос: позволяет ли квантовая механика полностью описать поведение отдельного электрона? Эйнштейн ответил: нет, не позволяет. Пусть A и B — два пятна на втором экране. Если известно, что какой-то электрон попал в участок A, то тут же становится ясно, что он не попал в участок B. Но отсюда следует, что между участками A и B имело место некое особенное мгновенно распространившееся действие, а это противоречит постулату относительности. Однако, как отметил Эйнштейн, в исследованиях эффекта Комптона, проводившихся Гейгером и Боте [B7], было установлено, что нет принципиальных ограничений на точность, с которой можно наблюдать одновременность событий в индивидуальных процессах, не прибегая к действию на расстоянии. Это обстоятельство еще больше подчеркивает неполноту предлагаемого описания дифракции.

Квантовая механика дает следующий ответ на вопрос Эйнштейна. Она применима к индивидуальным процессам, но принцип неопределенности накладывает ограничение и определяет тот оптимальный объем информации, который можно получить из данного конкретного эксперимента. Это ограничение совершенно отлично от тех ограничений на информацию, которые присущи крупнозернистому описанию процессов в классической статистической механике. Там они налагаются, для того чтобы получить рабочее приближение к описанию некоего процесса, для которого в идеале можно точно указать значение импульса и положение отдельных частиц. В квантовой же механике упоминавшееся выше ограничение не накладывается, напротив, оно является следствием отказа от фундаментальных соображений (можно сказать, на мелкозернистом уровне). Действительно, если потребовать строго причинного подхода к локализации электрона на каждом этапе проводимого эксперимента, то придется прибегать к действию на расстоянии. Но квантовая механика отрицает необходимость такого подхода и утверждает, что в данном эксперименте окончательное положение отдельного электрона нельзя предсказать с полной определенностью. Квантовая механика тем не менее позволяет найти вероятность, с которой тот или иной электрон попадает в заданный участок второго экрана. Проверка квантовомеханического предсказания требует, конечно, многократного проведения «эксперимента с одиночным электроном» до тех пор, пока не будет получено с желаемой точностью искомое распределение вероятности.

Нет здесь и противоречия с результатами опыта Гейгера — Боте, так как теперь речь идет о другом эксперименте, в котором обеспечивается локализация в пространстве-времени, по за

счет отказа от получения точной информации о свойствах энергии-импульса при соударении изучаемых частиц. При квантово-механическом подходе отказ от получения информации рассматривается как проявление законов природы. К этому случаю вполне применима английская поговорка: «Чтобы дальше прыгнуть, нужно отступить». Как мы увидим, то, что в глазах других выглядело приемлемой уступкой, Эйнштейну представлялось нетерпимым святотатством. Здесь он никогда и ничем не хотел поступиться.

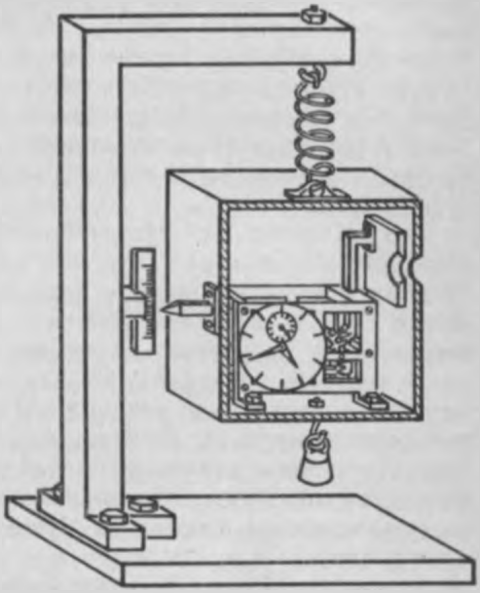
Я так подробно остановился на этой простой задаче потому, что она позволила проиллюстрировать позицию Эйнштейна, которую он позднее изложил более четко. Дискуссии Бора с Эйнштейном продолжались и в кулуарах шестого Сольвеевского конгресса, проходившего в 1930 г. (он был посвящен магнетизму). Тогда Эйнштейну показалось, что он нашел ситуацию, противоречащую принципу неопределенности. Его аргументация действительно была очень изобретательной. Представим себе ящик, в одной из стенок которого сделано отверстие; это отверстие может закрываться заслонкой по команде, подаваемой от находящихся в ящике часов. Ящик заполнен излучением. Взвешиваем ящик, после чего часы открывают заслонку на короткое время, достаточное для того, чтобы ящик мог покинуть один фотон. Через некоторое время взвесим ящик вновь. Тогда в принципе можно с произвольной точностью определить одновременно как энергию фотона, так и время его прохождения через отверстие, что противоречит принципу неопределенности.

«Для Бора это было настоящим ударом... он не мог сразу дать объяснение. Весь вечер он сильно страдал, ходил от одного к другому и старался всех убедить, что это не так, что если Эйнштейн прав, то физике пришел конец; но найти опровержения не мог. Никогда не забуду, как противники покидали университетский клуб: рядом с медленно шедшим высоким величественным Эйнштейном, на губах которого играла несколько ироническая улыбка, семенил страшно взволнованный Бор... На следующее утро пробил час триумфа Бора» [R1]

Позднее Бор проиллюстрировал свою аргументацию [B6, с. 199] при помощи экспериментальной установки, изображенной здесь. Первоначальное взвешивание производится путем регистрации положения прикрепленной к ящику стрелки относительно шкалы, находящейся на неподвижной раме. Изменение веса, вызываемое вылетом из ящика фотона, компенсируется подвешиванием под ящиком грузика, в результате чего стрелка возвращается к первоначальному положению с точностью до смещения Δq. Измерение веса производится соответственно с неопределенностью Δm. Грузик сообщает ящику импульс, который можно измерить с точностью Δp, определяемой соотношением $\Delta p \Delta q \approx h$. Очевидно, $\Delta p < gt\Delta m$, где t — время, требуемое для возвращения стрелки в исходное положение, g — ускорение свободного падения. Таким образом, $gt\Delta m\Delta q > h$. Далее Бор при-

менил формулу для красного смещения [8]): из неопределенности Δq положения стрелки часов в гравитационном поле следует неопределенность измерения времени t: $\Delta t = c^{-2} g t \Delta q$. Следовательно, $c^2 \Delta m \Delta t = \Delta E \Delta t > h$. Итак, точность, с которой измеряется энергия фотона, ограничивает точность, с которой может быть измерен импульс вылетающего фотона, что соответствует соотношению неопределенностей, связывающему энергию и время.

Обратите внимание, что каждая из многочисленных деталей, изображенных на чертеже, необходима для выполнения эксперимента: мощные болты фиксируют положение шкалы, относительно которой движется стрелка, пружина обеспечивает подвижность ящика в гравитационном поле, подвешиваемый грузик нужен, чтобы вернуть стрелку к исходному положению. Нет ничего нарочитого в повышенном внимании Бора к деталям — он так подробно изобразил их, чтобы показать, что, поскольку результаты всех физических измерений выражаются на языке классической науки, необходимо конкретно описать на этом же языке все используемые приборы.



Чертеж Бора, иллюстрирующий предложенный Эйнштейном эксперимент с часами в ящике [B6, с. 199]. (Воспроизводится с любезного разрешения проф. А. Шилпа)

После данного Бором объяснения Эйнштейн перестал искать несоответствия в квантовой механике, но к 1931 г. в его отношении к ней произошла резкая перемена.

Прежде всего, из его следующей статьи о квантовой механике [E15], представленной в феврале 1931 г., видно, что он согласился с критическими замечаниями Бора [9]). В статье речь идет о новом варианте эксперимента с часами в ящике. Экспериментальная информация об одной частице используется для того, чтобы предсказать поведение другой частицы. Выводы этой статьи, предвосхитившей работу, написанную совместно Эйн-

---

[8]) Напомню, что вывод этой формулы основан на замедлении времени по СТО и принципе эквивалентности.

[9]) В мысленном эксперименте, о котором говорится в этой статье, рассмотрено измерение времени. Авторы особо оговаривают то обстоятельство, что «ход часов не должен возмущаться гравитационными эффектами, связанными со взвешиванием ящика».

штейном, Подольским и Розеном (о ней речь пойдет ниже), не заслуживают упоминания [10]).

Гораздо более интересно позиция Эйнштейна изложена в его письме, написанном в сентябре того же года. В этом письме, адресованном Нобелевскому комитету, Эйнштейн представил к присуждению Нобелевской премии Гейзенберга и Шрёдингера. Обосновывая свое предложение, он сказал по поводу квантовой механики следующее: «Я убежден, что эта теория содержит часть окончательной истины»[11]). На самого Эйнштейна награды и отличия никогда не производили большого впечатления, но тем не менее, это представление — свидетельство духовной свободы и щедрости. Представление этих ученых ясно показывает также, что он стал рассматривать квантовую механику не как какую-то аномалию, а как серьезный профессиональный вклад в физику.

Это не значит, что Эйнштейн перестал критиковать квантовую механику. Он признал, что она содержит часть истины, но так никогда и не согласился с тем, что она содержит всю истину. После 1931 г. его стала заботить не столько проблема непротиворечивости квантовой механики, сколько вопрос ее полноты.

В течение последних 25 лет жизни Эйнштейн считал, что квантовая механика неполна. Он более не настаивал на ее несправедливости, а полагал, что физики ошибочно рассматривают постулаты квантовой механики как что-то окончательное; он считал такой взгляд наивным и неоправданным. Как именно он выражал свое несогласие, будет показано в ходе дальнейшего изложения.

В ноябре 1931 г. Эйнштейн выступил в Берлине на коллоквиуме с докладом «О соотношении неопределенностей» [E16]. В отчете об этом докладе не говорится о том, возражал ли Эйнштейн против соотношения, предложенного Гейзенбергом, но, читая его, ощущаешь, насколько не нравилась Эйнштейну возможность выбора между точным определением либо цвета светового луча, либо времени его прибытия. Мой друг Казимир рассказал мне о коллоквиуме, который проводил Эйнштейн в Лейдене; председательствовал на нем Эренфест [C1] (скорее всего, коллоквиум проходил в ноябре 1930 г.). В своем выступлении Эйнштейн обсуждал ряд аспектов эксперимента с часами в ящике. В последовавшей за этим дискуссии упоминалось, что его анализ не приводит к противоречию с квантовой механикой. Эйнштейн отреагировал на эти замечания так: «Я знаю, что здесь нет противоречий, но, по-моему, все-таки есть что-то неразумное».

---

[10]) Авторы вынуждены заключить, что «не существует метода, который позволял бы измерять импульс частицы, не изменяя его значения». Этот вывод, естественно, неприемлем.

[11]) Эйнштейн выдвигал кандидатуры Гейзенберга и Шрёдингера на присуждение Нобелевской премии еще в 1928 г. и вновь предлагал кандидатуру Шрёдингера в 1932 г. (см. гл. 30).

В 1933 г. Эйнштейн недвумысленно заявил, что, по его убеждению, квантовая механика не содержит логических противоречий. В своей Спенсеровской лекции он сказал о волновых функциях Шрёдингера следующее: «Предполагается, что эти функции позволяют вычислить только вероятности найти такие образования в известном месте или же в известном состоянии движения, когда производятся соответствующие измерения. Это толкование логически свободно от противоречий, и оно дало значительные результаты» [E17].

Впервые Эйнштейн четко выразил цель, которую поставил перед собой, в 1935 г. За основу ее достижения он взял критерий объективной реальности, которого придерживался до конца дней. К тому времени он уже обосновался в Принстоне. Я прерву сейчас рассмотрение проблем квантовой механики, для того чтобы рассказать о том, что произошло в жизни Эйнштейна и его семьи с 1932 по 1945 г.

§ 25.2. Эйнштейн в Принстоне

В Соединенных Штатах Эйнштейн окончательно обосновался в октябре 1933 г. Впрочем, он уже года за два до этого подумывал об отъезде. В декабре 1931 г. он записал в дневнике: «Сегодня я решил покинуть Берлин» [E18]. Эта запись сделана на борту парохода, на котором он впервые отправился в Пасадену. Обстановка действительно заставляла поразмыслить над последними событиями в Германии. Год назад нацисты сделали внезапный рывок и получили в рейхстаге 107 мест вместо 12.

Решение переехать в Принстон Эйнштейн принял после трех встреч с Абрахамом Флекснером [F1]. Первая из них произошла случайно. В начале 1932 г. Флекснер приехал в Пасадену для обсуждения с представителями Калифорнийского технологического института своего проекта создания нового исследовательского центра — Института высших исследований. Здесь он познакомился с Эйнштейном, и они в общих чертах обсудили план создания такого института. Во время второй встречи весной 1932 г. в Оксфорде Флекснер спросил, нет ли у Эйнштейна намерения переехать в Соединенные Штаты и работать в этом институте. Встретившись с Флекснером в третий раз в июне 1932 г. в Кануте, Эйнштейн сообщил ему, что с радостью примет это предложение при условии, что сможет взять с собой своего ассистента Вальтера Майера. Он спросил, может ли рассчитывать на жалованье в 3 тыс. дол. в год. «А может быть, я смогу прожить и на меньшую сумму?»,— спросил Эйнштейн [F2]. Сразу же начались официальные переговоры [E19], и в октябре 1932 г. назначение было утверждено [I1]. Годовое жалованье Эйнштейну было установлено в размере 15 тыс. дол. Занимательная история переговоров, касавшихся Вальтера Майера, описана в гл. 28.

Поначалу Эйнштейн собирался проводить пять месяцев в году в Принстоне, а остальное время в Берлине [K1, т. 1, с. 241],

но из этого ничего не вышло. На новых выборах в июле 1932 г. нацисты получили в рейхстаге 230 мест. В декабре Эйнштейн сказал жене, что она никогда больше не увидит Капута (§ 16.4). Десятого декабря 1932 г. Эйнштейны с 30 местами багажа отплыли из Бремерхавена в Калифорнию. В этот раз они покидали Германию навсегда.

Тридцатого января 1933 г. к власти пришел Гитлер. Через три дня после этого Эйнштейн еще писал в секретариат Прусской академии наук о своем жалованье [K1, т. 1, с. 242]. Однако ситуация ухудшалась на глазах, и 28 марта 1933 г. Эйнштейн послал в Берлинскую академию письмо о своей отставке [K1, т. 1, с. 246][12]). За неделю до этого «New York Times» сообщила о проведении «одной из самых блестящих операций в новейшей истории Германии» [N1] — немецкие войска обыскали дом Эйнштейна в Капуте, искали спрятанное оружие. Единственное, что было найдено подозрительного,— нож для хлеба.

В тот же день 28 марта Эйнштейн с семьей возвратился из Калифорнии в Антверпен. Им пришлось вернуться в Европу, так как у Эйнштейна остались различные незаконченные дела и, кроме того, необходимо было подготовить переезд в Принстон, которому теперь было суждено стать их последним приютом. Друзья и родственники помогли Эйнштейнам найти временное пристанище в Европе — виллу «Савояр» в Ле-Кок-сюр-мер, в Бельгии. Здесь к ним присоединились Ильзе и Марго, приехавшие из Парижа. Из Цюриха приехала Элен Дюкас, из Вены — Вальтер Майер. Кроме того, в доме были два охранника, предоставленных бельгийским правительством, которые должны были позаботиться о безопасности Эйнштейна, так как ходили упорные слухи о предполагаемых покушениях на его жизнь.

Все было устроено. Зять Эйнштейна, Рудольф Кайзер, проследил за тем, чтобы бумаги Эйнштейна были вывезены и переправлены дипломатической почтой на Кэ д'Орсэ[13]) в Париж. Мебель из дома на Габерландштрассе упаковали для перевозки, и спустя некоторое время она благополучно прибыла в Принстон. Эйнштейн отправился в путешествие по Европе. Он прочитал несколько лекций в Брюсселе; поехал в Цюрих, где в последний раз виделся с сыном Эдуардом; побывал в Оксфорде и 10 июня прочел Спенсеровскую лекцию, которую я так часто цитировал [E17].

Два дня спустя он снова выступил с лекцией в Оксфорде, а 20 июня был уже в Глазго, где прочел первую Гиббсоновскую лекцию, в которой речь шла об истоках общей теории относительности[14]) [E20]. Во время второго краткого визита в Англию

---

[12]) Двадцать первого апреля он также вышел из членов Баварской академии наук.

[13]) Так во Франции называют Министерство иностранных дел.— *Примеч. пер.*

[14]) Опубликованное в «New York Times» [N2] сообщение о том, что Эйнштейн присутствовал в августе на конгрессе сионистов в Праге, неверно.

Эйнштейн встречался с Черчиллем и другими общественными деятелями. В это время он получил много предложений от различных университетов. Вейцман приглашал его в Иерусалим. Эйнштейн отказался, не раздумывая, так как не одобрял методов работы администрации тамошнего университета. Звали его в Лейден и в Оксфорд. Предложения возглавить кафедры пришли из Мадрида и Парижа.

Среди всей этой суеты Эйнштейн и Майер ухитрялись все же заниматься физикой и закончили две статьи о полувекторах, которые послали в Голландию для публикации в трудах Нидерландской королевской академии наук [E21, E22]. В этих работах развивались идеи, изложенные в той статье, которую они закончили за несколько дней до отъезда Эйнштейна в Пасадену [E23]. Работы были выполнены по настоянию Эренфеста, который требовал установить более четкую зависимость между однокомпонентными и двухкомпонентными представлениями группы Лоренца [E23]. Вот что сделали Эйнштейн с Майером. Они поставили в соответствие взятому из СТО 4-вектору x_μ матрицу X размером 2×2:

$$X = \begin{pmatrix} x_0 + x_3 & x_1 - ix_2 \\ x_1 + ix_2 & x_0 - x_3 \end{pmatrix}, \tag{25.1}$$

такую, что $\det X$ равен квадрату инвариантной длины. Преобразуем X следующим образом:

$$X' = AXB, \tag{25.2}$$

где A и B — комплексные матрицы размером 2×2. Такое преобразование оставляет длину неизменной, если $\det A \det B = 1$. Произведем нормировку так, чтобы $\det A = 1$; тогда $\det A = \det B = 1$. При таких ограничениях уравнение (25.2) соответствует общей комплексной группе Лоренца без отражений; из этого требования сохранения вещественности следует, что $B = A^*$. При преобразовании

$$X' = AX \tag{25.3}$$

каждый из двух столбцов матрицы X преобразуется сам в себя. Эти столбцы, названные Эйнштейном и Майером полувекторами, являются двухкомпонентными представлениями собственной группы Лоренца; с точностью до линейных комбинаций они представляют собой спиноры [15]). Не все полученные результаты отличались новизной [K5], но все же это была изящная работа, выполненная независимо от других. Далее авторы применили понятие полувекторов к уравнению Дирака и обобщили формализм общей теории относительности. В результате исследования пар полувекторов они сделали следующий вывод: «...впервые дается объяснение тому, что существуют две электрически заряженные элементарные частицы с разными массами и электриче-

[15]) Подробно связь между полувекторами и спинорами обсуждалась В. Баргманом [B8].

скими зарядами противоположного знака» [E21]; однако вскоре стало ясно, что этот вывод неверен [16]).

Девятого сентября Эйнштейн навсегда покинул континент. Ле-Кок-сюр-мер находился слишком близко к границе с Германией, и оставаться там было опасно. Эйнштейн снова отправился в Англию, где провел несколько недель за городом. Третьего октября он выступил на массовом собрании в Лондоне, где председательствовал Резерфорд; там обсуждалась необходимость привлечь внимание к нуждам ученых, находящихся в изгнании [N3]. Потом подошло время отъезда. Ильзе и Марго вернулись в Париж. Эльза, Элен Дюкас и Вальтер Майер [17]) отплыли из Антверпена. Седьмого октября в Саутгемптоне к ним присоединился Эйнштейн. Все четверо отправились навстречу новой жизни, имея лишь гостевые визы.

Семнадцатого октября они прибыли в Нью-Йорк. На таможне их встречали Эдгар Бамбергер и Герберт Маас, попечители Института высших исследований, которые вручили Эйнштейну письмо от Флекснера, директора института. В письме, в частности, говорилось: «Нет сомнений, что в нашей стране существуют организованные банды безответственных нацистов. Я совещался с местными властями и с правительственными чиновниками в Вашингтоне, и все они убеждали меня, что для Вашей безопасности в Америке Вам необходимо хранить молчание и воздерживаться от публичных выступлений... Вас и Вашу жену с нетерпением ждут в Принстоне, но, в конечном счете, Ваша безопасность будет зависеть от Вашей собственной осторожности» [F3]. Эйнштейнов на специально посланном буксире перевезли в Баттери, а оттуда прямиком отправили в Принстон, где для них были заказаны комнаты в гостинице «Никок ин». Через несколько дней Эйнштейны с Элен Дюкас перебрались в арендованный дом на Лайбрери-плейс, 2. Здесь они и жили до 1935 г., когда купили у Мэри Марден дом № 112 по Мерсер-стрит, заплатив за него наличными. Переехали они в него осенью того же года. Этому дому суждено было стать последним пристанищем Эйнштейна. В 1939 г. законы о чистоте расы, принятые Муссолини, заставили сестру Эйнштейна Майю Винтелер покинуть небольшое имение под Флоренцией, которое Эйнштейн купил для нее и ее мужа Пауля. Майя поселилась у брата в Принстоне, Пауль — у Мишеля Бессо в Женеве.

Смерть иногда косит и молодых. В Париже после тяжелой болезни скончалась Ильзе. После ее смерти в Принстон приехала и Марго. В мае 1935 г. Эйнштейн с женой, Марго и ее мужем [18]) отправились на Бермудские острова, чтобы по возвра-

---

[16]) Зачем были написаны эти статьи, вообще непонятно, поскольку авторы знали о недавнем открытии позитрона [E21].

[17]) Утверждение одного из биографов [C2] о том, что Майер присоединился к Эйнштейнам в Англии, неверно.

[18]) Марго в течение короткого времени была замужем за Дмитрием Марьяновым.

нении получить иммиграпгские визы. Это был последний выезд Эйнштейна за пределы Соединенных Штатов. Вскоре после этого тяжело заболела Эльза. Она умерла 20 декабря 1936 г. от болезни сердца.

В 1938 г. в США приехал сын Эйнштейна Ганс Альберт. В 1926 г. он получил диплом инженера в Цюрихском политехникуме. В 1928 г. женился на Фриде Кнехт; тогда он жил в Дортмунде, где проработал несколько лет инженером по стальным конструкциям. В 1930 г. у них родился сын Бернард Цезар, первый внук Эйнштейна. В 1936 г. Ганс Альберт получил в политехникуме степень доктора наук. С 1947 по 1971 г. он был профессором гидравлики в Калифорнийском университете в Беркли. Однажды он так высказался об отце: «Возможно, единственный проект, от которого он отказался, был я. Он пытался давать мне советы, но скоро понял, что я слишком упрям и что это лишь пустая трата времени» [N4].

Вскоре после переезда в США Эйнштейн поделился своими принстонскими впечатлениями с королевой Бельгии: «Это занятная церемонная деревенька, в которой обитают ничтожные полубоги на ходулях» [E24]. Через полтора года он вновь писал ей: «Я совершенно безнадежно увяз в научных проблемах; положение усугубляется и тем, что, будучи человеком пожилым, в здешнем обществе я держусь особняком» [E25]. И в США обаяние Эйнштейна притягивало к нему людей. В январе 1934 г. он с Эльзой гостил у Рузвельта в Белом доме и провел ночь в комнате Франклина. К нему по-прежнему то и дело обращались с просьбами, на выполнение которых уходило много времени и сил. Просили, например, написать письмо, чтобы заложить в капсулу, которую предполагалось зарыть в землю на территории Нью-Йоркской всемирной ярмарки и открыть в 6369 г. (Эйнштейн сделал и это [N5].) Но все же Принстон, маленький благовоспитанный Принстон, ничем не напоминал огромного, полного жизни и противоречий Берлина времен Веймарской республики, и даже Эйнштейну, который жил напряженной внутренней жизнью, приходилось привыкать к новому окружению. И он делал это весьма успешно. Более спокойная жизнь постепенно оказывала свое воздействие. В доме зазвучала музыка. Он нашел старых друзей и завел новых. Иногда его можно было видеть на озере Карнеги на маленькой купленной им яхте, которую Элен Дюкас окрестила «Тиннеф» (в переводе с идиш это значит «дешевая»); название привилось. Водить он не умел, и машины у него никогда не было. Иногда Эйнштейн ездил в Нью-Йорк или куда-нибудь еще. Отпуск проводил на побережье острова Лонг-Айленд или в Адирондакских горах. В 1936 г. Эйнштейн обратился с просьбой о предоставлении ему американского гражданства, и 1 октября 1940 г. в Трентоне он, Марго и Элен Дюкас были приведены к присяге как американские граждане замечательным человеком, судьей Филиппом Форманом. (Он приводил

к присяге и меня, и я чту его память.) В том же году 5 ноября все трое уже голосовали за одного из кандидатов на президентских выборах, где баллотировались Рузвельт и Уиллки.

Эйнштейн продолжал заниматься физикой. То, что он сделал за эти годы, описывалось в других главах и будет еще упоминаться в следующем параграфе. К приезду Эйнштейна у института еще не было собственного помещения. Ему и другим профессорам выделили место в «старом» Файн-холле Принстонского университета (сейчас там размещается Институт востоковедения им. Геста). После 1939 г. они переехали в новое помещение. Единственной официальной обязанностью Эйнштейна было посещение факультетских собраний, что он и делал до выхода на пенсию в 1944 г. в возрасте 65 лет, и продолжал ходить на них до начала 50-х годов. С ним работали различные ученые, о которых я расскажу в гл. 28. Эйнштейн всегда с удовольствием встречался с любым, кто хотел обсудить с ним научные проблемы.

В течение 1933—1945 гг. по вполне понятным причинам Эйнштейн реже высказывался на политические темы, чем в прежние годы или после войны [19]). Поначалу он еще не был американским гражданином, а когда началась война, то вопрос стоял так — нужна только победа. С 1933 г. и до окончания войны он воздерживался от призывов к всеобщему разоружению и отказу от военной службы по соображениям совести. «Организованной силе может противостоять только организованная сила. К моему великому сожалению, другого выхода нет» [N3, с. 319]. Во время войны он одно время выступал в роли консультанта Бюро артиллерии ВМФ США.

Много было написано о письмах Эйнштейна президенту Рузвельту, в которых шла речь о необходимости создания атомного оружия [E26]. По поводу того, какое влияние они оказали, высказываются самые различные мнения [20]). Я считаю, что роль этих писем была незначительна. Действительно, Рузвельт распорядился о создании консультативного комитета по урану в составе трех человек в тот же день, когда ответил на первое письмо Эйнштейна, но решение о развертывании крупномасштабной программы создания атомного оружия было принято только в октябре 1941 г. Думаю, что такое решение было принято после получения сведений о работе англичан в этом направлении. Только тогда об атомном проекте впервые был информирован военный министр Стимсон [S2]. Позднее Эйнштейн неоднократно сожалел о том, что подписывал эти письма: «Знай я, что немцы не смогут сделать атомную бомбу, я бы и пальцем не пошевелил» [V1].

Рассказ о пребывании Эйнштейна в Принстоне будет продолжен и закончен в гл. 27. А сейчас, прежде чем заняться вопро-

---

[19]) Подробнее о взглядах Эйнштейна в 1933—1945 гг. можно прочесть в [N3, гл. 8—10].

[20]) С мнениями генерала Гровса, И. Раби и Ю. Вигнера можно ознакомиться в [L1].

ром об объективной реальности, расскажу анекдот из первых лет пребывания Эйнштейна в Принстоне, который передала мне Элен Дюкас.

В то время как высокопоставленный чиновник произносил речь на приеме в честь Эйнштейна, почетный гость достал из кармана ручку и, явно забыв обо всем, начал записывать уравнения на обратной стороне программы. Речь закончилась пышным оборотом, все встали и, аплодируя, повернулись к Эйнштейну; Элен шепнула, чтобы он встал. Тот послушно поднялся и тоже зааплодировал, не подозревая, что овация относится к нему. Так он и стоял и хлопал в ладоши, пока Элен не сказала, что аплодируют именно ему.

§ 25.3. Эйнштейн и объективная реальность

В своем выступлении в Комо Бор отметил, что квантовая механика, как и теория относительности, требует уточнения наших обыденных представлений о явлениях, происходящих в неживой природе. «Мы идем по тому самому пути, который проложил Эйнштейн, начав приспосабливать наши заимствованные из ощущений типы представлений к постоянно углубляющемуся познанию законов природы» [B5]. Еще в 1927 г. он подчеркивал, что следует очень тщательно выбирать формулировки, отражающие результаты наблюдений квантовых эффектов. «Препятствия, с которыми мы встречаемся на этом пути, связаны прежде всего с тем, что каждое слово в языке относится к нашему восприятию». Беспокойство по поводу роли языка в толковании квантовой механики не оставляло его всю жизнь. В 1948 г. он высказался так: «В физической литературе часто встречаются фразы типа „наблюдение возмущает явление“ или „создание физических атрибутов объектов в результате измерений“, в которых использование слов „явления“ или „наблюдения“, равно как и „атрибуты“ и „измерение“, вряд ли совместимо с их повседневным использованием и практическим определением, что, несомненно, может вызывать путаницу. Поэтому в качестве более уместного способа выражения можно настоятельно рекомендовать ограничение использования слова „явление“, которое должно относиться исключительно к наблюдениям, проводившимся при строго определенных условиях, с учетом всех обстоятельств проведения эксперимента» [B9].

Именно в таком смысле слово *явление* применяется сейчас большинством, если не всеми физиками.

В отличие от тех, кто был уверен в том, что понятие явления *с необходимостью* включает в себя учет всех конкретных условий эксперимента, в ходе которого проводятся наблюдения, Эйнштейн считал, что нужно искать более глубокие теоретические представления, позволяющие описывать явления вне зависимости от данных условий. Под термином *объективная реальность* он понимал именно это. После 1933 г. он был практически един-

ственным, кто полагал, что, хотя квантовая механика логически непротиворечива, она есть лишь некое незавершенное представление более глубокой теории, допускающей описание с применением объективной реальности.

В статье, написанной в 1935 г. вместе с Борисом Подольским и Натаном Розеном [E27], Эйнштейн изложил свои аргументы, рассматривая, как всегда, простые примеры. Эта статья «произвела сенсацию среди физиков и сыграла важную роль в философских дискуссиях» [B10][21]). В ней содержится следующее определение: «Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью (т. е. с вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине». Далее авторы рассматривают следующую задачу. Пусть две частицы, имеющие импульсы и координаты (p_1, q_1) и (p_2, q_2), находятся в состоянии с определенными полным импульсом $P = p_1 + p_2$ и относительным расстоянием $q = q_1 - q_2$. То, что это возможно, сомнения не вызывает, поскольку P и q коммутируют. Затем происходит взаимодействие частиц, и спустя достаточно продолжительное время производятся наблюдения над частицей 1. Измерение p_1 позволяет узнать значение p_2, не возмущая частицу 2. Таким образом (если следовать формулировкам авторов), импульс p_2 содержит элемент реальности. Потом измеряют q_1, откуда опять-таки, не возмущая частицу 2, определяют значение q_2. Значит, q_2 есть также элемент реальности, т. е. и p_2 и q_2 — элементы реальности. Но из квантовой механики следует, что p_2 и q_2 не могут быть одновременно элементами реальности, поскольку импульс и координата данной частицы — некоммутирующие операторы. Следовательно, квантовая механика неполна.

Авторы подчеркивают, что они «не пришли бы к [такому] заключению, если бы настаивали на том, что две ... физических величины могут одновременно считаться элементами реальности *только в том случае, если их можно одновременно измерить или предсказать*». Далее следует фраза, совершенно необходимая для понимания взглядов Эйнштейна (часть ее я выделил курсивом): «Здесь [т. е. при одновременном предсказании] реальность p_2 и q_2 ставится в зависимость от процесса измерения, производимого над первой системой, хотя этот процесс никоим образом не влияет на вторую систему. *Никакое разумное определение реальности не должно допускать этого*».

Единственные слова этой статьи, которые, по-моему, будут справедливы всегда, это последняя фраза, где так четко резюми-

---

[21]) На эту сенсацию обратила внимание и пресса. В выпуске «New York Times» от 4 мая 1935 г. была опубликована статья «Эйнштейн нападает на квантовую теорию», в которой приводилось также интервью с другим физиком. В выпуске от 7 мая та же газета опубликовала заявление Эйнштейна с резким осуждением этой статьи, на публикацию которой он не давал согласия.

ровано отношение Эйнштейна к квантовой механике в последние годы его жизни. Иногда то, о чем идет речь в статье, называют парадоксом Эйнштейна — Подольского — Розена. Я считаю необходимым подчеркнуть, что эта работа не содержит ни парадокса, ни какого-либо логического изъяна. В ней просто сделан вывод, что понятие «объективная реальность» несовместимо с предположением о полноте квантовой механики. Этот вывод никак не повлиял на дальнейшее развитие физики, и сомневаюсь, что он окажет какое-нибудь влияние в будущем.

«...Только взаимное исключение всяких двух экспериментальных манипуляций, которые позволили бы дать однозначное определение двух взаимно дополнительных физических величин... освобождает место для новых физических законов»,— писал Бор в работе, отвергавшей подход Эйнштейна [B10]. Бор не считал, что выводы, сделанные в статье Эйнштейна, Подольского и Розена, требуют пересмотра интерпретации квантовой механики. Большинство физиков (и я в том числе) согласно с мнением Бора.

На этом я заканчиваю рассказ об отношении Эйнштейна к квантовой механике. Он возвращался к критерию объективной реальности в ряде более поздних статей [E28—E31], где несколько раз повторял аргументацию [E27]. В них не содержится ничего существенно нового. В одной из этих работ, а именно [E30], Эйнштейн рассматривал вопрос о том, должно ли квантовомеханическое понятие явления относиться также и к телам обычного размера. Ответ, конечно же, утвердителен.

Естественно, не один Бор возражал против критерия объективной реальности; точно так же Эйнштейн был не единственным, кто критиковал дополнительность[22]). Я решил ограничиться обсуждением диалога Бор — Эйнштейн потому, что, по-моему, взгляды Эйнштейна наиболее рельефно проявляются в сравнении с позицией Бора. Кроме того, благодаря беседам с ними обоими я хорошо знаком с ходом их мыслей. Бор окончательно шлифовал свою статью 1949 г. [B6], находясь в Принстоне, и мы часто беседовали с ним на эту тему. (Именно во время одной из таких бесед Эйнштейн [которому врачи запретили курить.— *Пер.*] тайком прокрался в кабинет, чтобы стащить немного табаку [P1].) Необходимо, однако, подчеркнуть, что и другие физики-теоретики и математики много сделали в этой области. Активное участие в работах принимали и экспериментаторы. Был проведен ряд экспериментальных проверок квантовой механики вообще и предсказаний конкретных альтернативных под-

---

[22]) В 1950 г. Эйнштейн среди тех, кто разделяет его взгляды, упомянул только Шрёдингера и Лауэ [E32]. На самом деле в то время (как, впрочем, и позднее) многие ученые сомневались в справедливости толкования с применением дополнительности, но их взгляды не обязательно совпадали или перекрещивались со взглядами Эйнштейна (см. [E33]). Отмечу также, что термин *скрытая переменная*, насколько мне известно, ни разу не встречается ни в статьях, ни в письмах Эйнштейна.

ходов [23]). Ни одна из этих проверок не привела к каким-либо неожиданностям.

Как уже неоднократно подчеркивалось, для того чтобы лучше осознать мировоззрение Эйнштейна, необходимо учитывать не только его критические замечания, но и его дар провидения. В этой главе был показан Эйнштейн-критик. В следующей главе мы познакомимся с мировоззрением Эйнштейна.

Глава 26. НАУЧНОЕ МИРОВОЗЗРЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА

§ 26.1. Эйнштейн, Ньютон и успех

Непоколебимая уверенность Эйнштейна в том, что квантовая механика не является фундаментальной теорией, не мешала ему, однако, признавать, что она позволяет добиться больших успехов. Еще в 1927 г. он во всеуслышание заявил, что волновая механика находится «в поразительном соответствии с данными опыта» [E1]. В 1936 г. Эйнштейн писал: «...кажется очевидным, что данное Борном статистическое истолкование квантовой теории является единственно возможным» [E2], а в 1949 г. отметил: «Статистическая квантовая механика ... из всех физических теорий нашего времени достигла наибольших успехов» [E3]. Почему же он так и не примирился с ней?

Мне кажется, что Эйнштейн косвенно ответил на этот вопрос в Спенсеровской лекции 1933 г., которая наиболее ярко отражает его способ мышления в зрелые годы жизни. Важнее всего то, что он говорил о Ньютоне и классической механике. В лекции [E4] Эйнштейн отметил: «...из ньютоновых формулировок мы видим, что понятие абсолютного пространства ... абсолютного покоя [и] ... введение дальнодействующих сил ... доставляли ему неприятное чувство». Дальше он так высказался об успехе теории Ньютона: «...огромный практический успех его учения, по-видимому, воспрепятствовал ему, как и физикам XVIII и XIX вв., признать произвольный характер основ его системы». Под словом *произвольный* Эйнштейн имел в виду свободные построения человеческого разума. Затем он сравнил механику Ньютона со своими работами по ОТО: «...можно сказать, что их умозрительный характер вполне очевиден из того факта, что мы можем указать на две существенно различные основы [механику Ньютона и механику ОТО], которые обе в высокой степени соответствуют опыту». (Напомню, что эти слова были сказаны задолго

---

[23]) Обычно во всех этих проверках рассматривались различные варианты представлений, изложенных в статье [E27], например дальнодействующая корреляция между спинами или поляризацией. Сознаюсь, что недостаточно знаком с обширной литературой, посвященной теории и эксперименту в этой области. В основном я руководствовался книгой Джеммера [J1] и обзорной статьей Пипкина [P2]. Обе эти работы содержат ссылки на другие литературные источники.

до того, как стало ясно, насколько резко предсказания механики Ньютона отличаются от предсказаний ОТО при рассмотрении сильных гравитационных полей.)

В той же Спенсеровской лекции Эйнштейн отметил успехи не только классической механики, но и статистической интерпретации квантовой теории: «Это толкование логически свободно от противоречий, и оно дало значительные результаты». Но далее он добавил: «Я все еще верю в возможность построить такую модель реальности ... которая выражает сами [события], а не только [их] вероятности».

Из этой лекции, а также из бесед с Эйнштейном об основах квантовой физики я вынес следующее впечатление. Он постоянно сравнивал успехи классической механики с успехами квантовой механики. По мнению Эйнштейна, эти теории находились в одинаковом положении: обе позволяли получать правильные результаты, но страдали неполнотой. Более десяти лет он размышлял над одним вопросом: как обобщить принцип инвариантности равномерного поступательного движения на все виды движений? Созданная им в итоге ОТО приводит к результатам, лишь немногим отличающимся от результатов теории Ньютона. (Те обстоятельства, при которых эти отклонения становятся значительными, стали обсуждаться гораздо позже.) Поэтому он был готов согласиться с тем, что практические достижения квантовой механики гарантируют ей долгую жизнь, хотя, возможно, в конечном счете придется вносить в нее незначительные изменения. Он был готов сам искать объективную реальность, невзирая на то, сколько ему потребуется времени. Вполне вероятно, что его величайшее достижение — ОТО — дало дополнительный импульс обособленности Эйнштейна. Но не следует все же забывать, что обособленность всегда была характерной чертой Эйнштейна и проявлялась как в научном творчестве, так и в жизни.

Рассматривая отношение Эйнштейна к квантовой теории, очень важно понимать: он не столько отрицательно относился к тому, что было сделано другими, сколько глубоко верил в правильность своего особого подхода к квантовым проблемам. Его убеждения можно резюмировать следующим образом:

1. Квантовая механика является крупным достижением, но она остается лишь предельным случаем теории, которую еще предстоит создать: «Нет сомнения, что в квантовой механике имеется значительный элемент истины и что она станет пробным камнем для любой будущей теоретической основы, из которой она ... будет выведена как частный случай, подобно тому как электростатика выводится из уравнений Максвелла для электромагнитного поля или термодинамика из [статистической] механики» [E2].

2. Не следует строить новую теорию, положив в основу квантовую механику, а потом вносить в нее уточнения или давать ей новое толкование: «Я не думаю, что квантовая механика яв-

ляется *исходной точкой* поисков этой основы, точно так же, как нельзя, исходя из термодинамики (или соответственно из статистической механики), прийти к основам механики» [E2].

3. Напротив — и в этом заключается суть воззрений Эйнштейна — *нужно начать все сначала* и попытаться получить квантовую теорию как следствие или обобщение ОТО. Эйнштейн никогда не боялся начинать все сначала. Это самая главная черта, которая сохранилась в его характере с юности до последних дней. Глубокое уважение к Лоренцу не помешало Эйнштейну отвергнуть его динамическое толкование сокращения размеров стержней и опыта Физо. Восхищение Ньютоном не помешало отвергнуть представление об абсолютном пространстве. Двух своих величайших достижений — СТО и ОТО, этих фундаментальных теорий, Эйнштейну удалось добиться, начав все сначала. Он собирался поступить так же и с квантовой теорией — пусть даже на это уйдет вся жизнь. В 1950 г. он писал Борну: «Я убежден в [объективной реальности], хотя пока *успех* против нее» [E5].

Эйнштейн понимал, что он одинок. Знал он и о том, как к нему относятся другие. «В глазах моих коллег я выгляжу упорствующим еретиком»,— писал он другу [E6]; в другой раз он выразился так: «Ко мне в общем относятся, как к окаменелости, которую возраст сделал слепой и глухой. Меня такое отношение не очень огорчает, так как оно прекрасно соответствует моему темпераменту» [E7]. Эйнштейн знал, а иногда и говорил о том, что идет по избранному пути один [E8], но все равно не сдавался. «Мимолетный успех кажется большинству более притягательным, чем размышления над фундаментальными проблемами» [E9].

Эйнштейн остроумно защищал свое отношение к квантовой теории и, так как не был непогрешимым, иногда высказывался довольно едко. Однажды он сказал, что Бор мыслит очень ясно, пишет туманно и считает себя пророком [S1]. В другой раз он назвал Бора мистиком [E10]. А однажды в письме Бору Эйнштейн, имея в виду свою позицию, процитировал старый немецкий стишок: «Все головами качали, когда речам Джобса внимали» [E11]. Были моменты, когда он тяжело переживал свое положение: «Вряд ли Вы понимаете, насколько мне одиноко» [E12]. Наверное, он выражал далеко не все, что чувствовал, но так уж он был устроен. «...Главное в жизни человека моего склада заключается в том, *что* он думает и *как* он думает, а не в том, что он делает или испытывает» [E3].

Обособленность Эйнштейна в его отношении к основам квантовой физики проявилась еще до создания квантовой механики. Это вторая характерная черта, сохранившаяся у него с молодых лет до старости. Более подробно мы поговорим об этом в § 26.3, а сейчас скажу несколько слов, завершая тему, которую затронул в гл. 2: об отношении Эйнштейна к квантовой теории и теории относительности.

§ 26.2. Теория относительности и квантовая теория

В ранних научных трудах Эйнштейна поражает то, что он отделял теорию относительности от квантовой теории даже тогда, когда установить связь между ними представлялось естественным и очевидным. Такое разделение проведено уже в его первой работе о теории относительности, где он отметил: «Замечательно то, что и энергия, и частота светового комплекса с изменением состояния движения наблюдателя меняются по одному и тому же закону» [E13]. Здесь, очевидно, можно было бы сослаться на соотношение $E = h\nu$, приведенное в его работе о световых квантах, которую он закончил лишь несколькими месяцами раньше. Но Эйнштейн этого не сделал. В сентябрьской статье 1905 г. о теории относительности [E14] Эйнштейн упомянул об излучении, но не о световых квантах. Выступая в Зальцбурге в 1909 г., он рассматривал как теорию относительности, так и квантовую теорию, но также раздельно [E15]. В § 21.3 отмечалось, что в статье 1917 г. Эйнштейн приписал световым квантам энергию $E = h\nu$ и импульс $p = h\nu/c$. Эта работа заканчивается следующими словами: «...энергия и импульс непосредственно связаны друг с другом; поэтому теорию можно считать правильной лишь в том случае, если показано, что импульсы, переносимые, согласно этой теории, от излучения к веществу, приводят к таким движениям, которых требует теория теплоты» [E16]. Почему же Эйнштейн упомянул только термодинамику и ничего не сказал о теории относительности? Мне кажется, для него теория относительности была настолько очевидной, что феноменологический и временный характер квантовой теории делал преждевременными, а может быть, и нецелесообразными попытки установить связь с релятивистским подходом.

Так обстояло дело во времена «старой» квантовой теории. Так все осталось и после появления квантовой механики. В предыдущем параграфе я отметил, что, по мнению Эйнштейна, квантовая механика позволила добиться больших успехов. Теперь необходимо уточнить, что это его мнение относилось исключительно к нерелятивистской квантовой механике. По своему опыту знаю, как трудно было обсуждать с Эйнштейном проблемы квантовой теории поля. Он считал, что нерелятивистская квантовая механика не дает достаточно прочной основы для релятивистских обобщений [E17, E18]. Релятивистская квантовая теория поля была ему отвратительна [B1]. Вальтер Тирринг сообщил мне о своем разговоре с Эйнштейном, в ходе которого «тот стал возражать все решительнее, когда речь зашла о квантовой теории поля; он не верил в справедливость ее следствий» [T1]. Валентин Баргман рассказал мне, что однажды Эйнштейн попросил его в частном порядке подготовить обзор по квантовой теории поля, начиная со вторичного квантования. Баргман занимался этим в течение примерно месяца, но потом интерес Эйнштейна к данной области угас.

Все, что говорилось выше по поводу квантовой теории поля, относилось главным образом к ее варианту, основанному на СТО. В § 2.2 я отметил, что по сей день на пути синтеза квантовой теории и ОТО стоят концептуальные трудности. Не *это ли* беспокоило Эйнштейна? Как хорошо видно из последних фраз его статьи, посвященной памяти Максвелла, нет, не это: «...я склоняюсь к мнению о том, что физики не будут долго довольствоваться такого рода косвенным описанием реальности, *даже если* [*квантовая*] *теория будет удовлетворительным образом приспособлена к постулату общей теории относительности* (курсив мой.— *А. П.*). Тогда мы снова должны будем вернуться к попытке реализации той программы, которую с правом можно назвать максвелловской, а именно: к описанию физической реальности посредством полей, не имеющих особенностей и удовлетворяющих дифференциальным уравнениям в частных производных» [E19].

Это исключительно эйнштейновская программа. Суть ее заключается в том, что нельзя в качестве исходных правил брать постулаты квантовой теории, а затем приспосабливать эти правила к ОТО. Он считал, что вместо этого следует начинать с классической теории поля, с единой теории поля и добиваться того, чтобы квантовые правила появлялись в виде ограничений, накладываемых самой этой теорией.

В следующем параграфе, посвященном квантовой теории, я расскажу, как Эйнштейн надеялся добиться поставленной цели. Вопрос, *почему* он питал такие надежды, снова выводит нас на грань истории, и здесь нельзя дать определенного ответа. Мне кажется, что крупные достижения могут вызвать своего рода шок у их автора и что чистота теорий относительности подействовала на Эйнштейна ослепляюще. Сам он сказал почти то же самое: «Тому, кто ... что-то открывает, плоды его воображения кажутся столь необходимыми и естественными, что он считает их не мысленными образами, а заданной реальностью» [E4]. Упорное стремление Эйнштейна к обеспечению объективной реальности — прекрасный пример такого мыслительного процесса.

Наконец, еще раз повторю свое мнение о том, что возражения технического характера, высказанные Эйнштейном в адрес квантовой механики, необоснованны. Но я не знаю, полна ли квантовая механика или общая теория относительности, не знаю, можно ли добиться их вожделенного объединения путем простого синтеза постулатов той и другой теорий.

§ 26.3. Сверхпричинность

В 1923 г. Эйнштейн опубликовал работу под названием «Предлагает ли теория поля возможности для решения квантовой проблемы?» [E20]. В начале он напомнил об успехах, достигнутых в электродинамике и ОТО с использованием причинного описания: причинность между событиями устанавливается дифференциальными уравнениями с начальными условиями на простран-

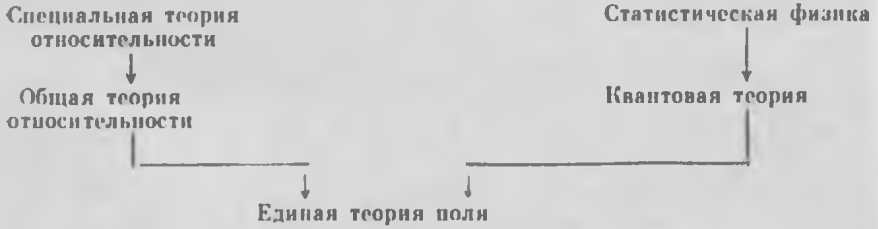
ственноподобной поверхности. Однако этот метод не может применяться к квантовым проблемам, не вызывая осложнений. По словам Эйнштейна, дискретность боровских орбит указывает на то, что начальные условия нельзя выбирать произвольно. Далее он поставил вопрос, можно ли, тем не менее, включить эти квантовые ограничения в (причинную) теорию, строящуюся на дифференциальных уравнениях в частных производных, и дал такой ответ: «Конечно, можно, мы должны только сделать, чтобы [соответствующие] уравнения были переопределены относительно переменных поля». Затем Эйнштейн изложил свою программу, основанную на следующих трех требованиях: 1) общей ковариантности, 2) соответствия искомых уравнений (как минимум) теории тяготения и теории Максвелла, 3) необходимости существования для искомой системы уравнений, переопределяющей поле, статического центрально-симметричного решения, описывающего электрон и протон. Если такого переопределения удастся достичь, то «можно надеяться, что этими уравнениями будут одновременно определяться и механические свойства особых точек (электронов) таким образом, что начальные состояния поля и особых точек также будут подчиняться ограничительным условиям». Далее Эйнштейн рассмотрел возможный пример применения своей идеи и в заключение указал: «...для меня самой главной в этом сообщении является идея о переопределенности...».

До 1923 г. Эйнштейн уже размышлял над такими соображениями в течение нескольких лет. В 1920 г. он писал Борну: «Я все не могу воплотить в удовлетворительной форме свою любимую идейку, смысл которой состоит в том, чтобы при помощи дифференциальных уравнений понять структуру квантов за счет избыточности определения» [E21]. Насколько мне известно, здесь впервые Эйнштейн упомянул о такой стратегии. Вполне вероятно, что подобные идеи стали приходить ему в голову вскоре после 1917 г., когда он не только завершил работу над ОТО, но и обнаружил отсутствие причинности при спонтанном излучении [E16]. Об отношении других ученых к тогдашним идеям Эйнштейна читаем у Борна: «В те дни [в начале 1925 г.] мы все считали, что эта цель... достижима, а работы в этом направлении очень важны» [B2]. Сам Эйнштейн был уверен в том, что у него просто нет выбора: «Этот путь может оказаться неверным, но все равно его необходимо попробовать» [E22].

И тогда, и позднее Эйнштейн надеялся, что переопределение позволит дать ответ на квантовые проблемы. Через шесть лет, выступая на юбилее Планка, он энергично отстаивал свою точку зрения: понимание квантовых явлений отнюдь не требует отказа от классической причинности, как это делается в квантовой механике. Напротив, необходимо подчеркнуть роль классической причинности: «То, что происходит в природе, по-видимому, настолько детерминировано, что глубокие закономерности связывают не только протекание процесса во времени, но и его на-

чальное состояние. Я надеялся, что эту идею удастся реализовать, если я сумею найти переопределенную систему дифференциальных уравнений... Я глубоко убежден в том, что мы не остановимся на уровне субпричинности, а придем в конце концов к сверхпричинности в том смысле, о котором говорилось выше...» [E23].

Наконец, я могу раскрыть, в чем состояло научное мировоззрение Эйнштейна. Он искал единую теорию поля, но для него это понятие имело смысл, несколько отличный от того, который в него вкладывали и вкладывают другие ученые. Он хотел, чтобы эта теория была строго причинной, чтобы в ней объединялись тяготение и электромагнетизм, чтобы частицы появлялись в виде частных решений общих уравнений поля и чтобы квантовые постулаты были *следствием* общих уравнений поля. Именно эти критерии имел в виду Эйнштейн, когда писал в 1949 г.: «Наша задача состоит в том, чтобы найти уравнения для полного поля» [E3]. Итак, процесс эволюции научных взглядов Эйнштейна можно изобразить схемой, которая приводилась в обращении к читателю:



В гл. 17 мы обсуждали те работы Эйнштейна по единой теории поля, которые относились к объединению тяготения и электромагнетизма. Добавлю несколько слов по поводу квантовых аспектов.

Из переписки Эйнштейна видно, что часто он одновременно занимался единой теорией поля и квантовыми проблемами. Приведу лишь несколько примеров. В 1925 г., работая над одной из теорий с несимметричной метрикой, Эйнштейн писал другу: «Сейчас вопрос состоит в том, совместима ли данная теория поля с существованием атомов и квантов» [E24]. О той же обобщенной теории идет речь и в письме 1942 г. «То, чем я сейчас занимаюсь, может показаться тебе странноватым. Но нужно, однако, учитывать, что корпускулярно-волновой дуализм требует чего-то доселе неслыханного» [E25]. В 1949 г. он писал: «Я убежден, что ... статистическая [квантовая] теория слишком поверхностна и что следует опираться на фундамент общей теории относительности» [E26]. В 1954 г. он высказался так: «Я, должно быть, выгляжу страусом, прячущим голову в релятивистский песок, чтобы не видеть зловредных квантов» [E27].

Эйнштейн долго и безуспешно размышлял, как бы ему реализовать свою мечту — вывести квантовую теорию из единой тео-

рии поля. Это всепоглощающее стремление объясняет, почему он упоминал квантовую теорию иногда в самых неожиданных местах. Его первая написанная совместно с Громмером статья о проблеме движения (§ 15.6) заканчивается так: «...впервые показано, что теория поля может содержать в себе теорию механического движения дискретных частиц вещества. Это может иметь значение для ... квантовой теории» [E28]. Однако в продолжении, написанном к этой статье, он отказался от последнего утверждения [E29]. В 1930 г. Эйнштейн читал лекцию о единой теории поля, в отчете о которой говорится: «Он подчеркнул, что никоим образом не принимает во внимание результаты квантовых расчетов, так как считает, что при рассмотрении микроскопических явлений эти результаты появятся сами собой» [E30]. Краткое сообщение 1931 г. о пятимерной теории, в которой ставилась цель объединить тяготение и электромагнетизм, заканчивалось так: «В этой теории еще не содержатся результаты квантовой теории» [E31]. Через два месяца после окончания работы над статьей, которую он писал с Подольским и Розеном, Эйнштейн с Розеном написали еще одну статью о свободных от сингулярностей решениях уравнений гравитационно-электромагнитного поля [E32]. Одна фраза из этой статьи: «...априори не видно, включает ли [предлагаемая теория] и теорию квантовых явлений...» — вновь ярко иллюстрирует размах той программы, которую наметил для себя Эйнштейн. Этой программе суждено было остаться неосуществленной. Объединения тяготения с электромагнетизмом добиться не удалось, квантовая физика по-прежнему стоит особняком, удовлетворительных решений, приводящих к появлению частиц, до сих пор нет.

Добавлю еще несколько разрозненных замечаний.

После краткого увлечения уравнением Дирака (§ 25.2) Эйнштейн пришел к убеждению, что искомые уравнения общего поля позволят получить частицы с ненулевым спином как сферически-несимметричные решения указанных уравнений (В. Баргман, частное сообщение). Эйнштейн, видимо, надеялся, что идея о переопределенности приведет к получению дискретных значений спина[1]). Он также надеялся, что из будущей теории удастся вывести неполностью локализуемые решения, которые бы соответствовали частицам, несущим квантованный электрический заряд [E4].

В 1925 г. Эйнштейн указал, что если комбинированные уравнения гравитационного и электромагнитного полей имеют решения в виде частиц зарядом e и массой m, то они должны также допускать существование решений с $(-e, m)$! [E33]. В доказательстве используется обращение времени в комбинированных уравнениях. (В аналогичном контексте наличие решений $(\pm e, m)$

[1]) Отмечу мимоходом, что в 1925 г. Эйнштейн помогал Уленбеку и Гаудсмиту объяснить происхождение спин-орбитальной связи электронов в атомах [U1].

было впервые показано Паули [P1].) Этот результат заставил Эйнштейна на время усомниться в том, что можно вообще добиться объединения тяготения с электромагнетизмом. (Напомню, что, по мнению Эйнштейна, частицы должны были появляться в единой теории поля в виде частных решений уравнений.)

Путеводной нитью в поисках Эйнштейна была простота: «По моему мнению, есть правильный путь, и мы в состоянии найти его. Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов» [E4]. Еще в 1927 г. Гейзенберг подчеркивал в письме Эйнштейну, что его концепция простоты и простота, присущая квантовой механике, не могут быть достигнуты одновременно: «Если я правильно понял Вашу точку зрения, то Вы охотно пожертвовали бы простотой [квантовой механики] в пользу принципа [классической] причинности. Можно, видимо, утешиться мыслью о том, что всевышний мог бы придумать что-нибудь похлеще [квантовой механики] и сохранить причинность. По-моему, некрасиво требовать чего-либо, кроме физического описания связи между экспериментами» [H1].

К концу жизни Эйнштейн стал сомневаться в верности своих представлений: «[Теория относительности и квантовая теория] кажутся мало приспособленными для объединения в единую теорию»,— отметил он в 1940 г. [E34]. Около 1949 г. он писал Борну: «Наши с Вами любимые коньки навсегда разбежались в разные стороны... Даже я неуверенно держусь на своем» [E35]. В начале 50-х годов Эйнштейн однажды сказал мне, что не уверен в возможности добиться прогресса в рамках дифференциальной геометрии, но если это в принципе возможно, то он на правильном пути[2]). В 1954 г. он писал своему другу Бессо: «Я считаю вполне вероятным, что физика может и не основываться на концепции поля, т. е. на непрерывных структурах. Тогда *ничего* не останется от моего воздушного замка, включая теорию тяготения, как, впрочем, и от всей современной физики» [E37]. Я думаю, большинство физиков сочтут этот приговор чересчур суровым. В одном из последних предисловий к книгам, написанным другими (а таких предисловий было много), Эйнштейн выразился так: «Мои усилия пополнить общую теорию относительности... предприняты отчасти в связи с предположением о том, что ... разумная общая релятивистская [классическая] теория поля, возможно, могла бы дать ключ к более совершенной квантовой теории. Это — скромная надежда, но никак не убеждение» [E38].

---

[2]) В. Баргман рассказал мне, что примерно то же самое Эйнштейн говорил ему в конце 30-х годов. Такого же рода высказывание содержится и в письме Инфельду: «Я все больше и больше склоняюсь к мысли, что нельзя продвинуться дальше, используя теории, строящиеся на континууме» [E36].

Но, как мне рассказала Элен Дюкас, однажды Эйнштейн заметил за обедом (она не помнит, в каком году), что лет через сто физики поймут его. Мне также кажется, что, когда Эйнштейн писал о Спинозе, он имел в виду себя: «Хотя Спиноза жил триста лет тому назад, духовная обстановка, в условиях которой ему приходилось бороться, очень близко напоминает нашу. Спиноза был полностью убежден в причинной зависимости всех явлений еще в то время, когда попытки достичь понимания причинных связей между явлениями природы имели весьма скромный успех» [E39].

Эйнштейн не переставал размышлять над квантовой теорией до конца своих дней. Последние автобиографические наброски он написал в Принстоне в марте 1955 г., примерно за месяц до смерти. В заключительных фразах речь идет о квантовой теории: «Кажется сомнительным, может ли [классическая] теория поля объяснить атомистическую структуру вещества и излучения, а также квантовые явления. Большинство физиков, несомненно, ответят убежденным „нет“, ибо они считают, что квантовая проблема должна решаться принципиально иным путем. Как бы то ни было, нам остаются в утешение слова Лессинга: „Стремление к истине ценнее, дороже уверенного обладания ею“» [E40].

Глава 27. ПОСЛЕДНЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

Эйнштейн до конца дней сохранил ясный ум. И все же в последние десять лет возраст, состояние здоровья, постоянное желание заниматься физикой и множество дел, не имевших отношения к науке, заставляли его экономно расходовать силы и время. Эйнштейн всегда старался придерживаться простого распорядка дня. К завтраку он спускался около девяти, потом читал свежие газеты. Около половины одиннадцатого отправлялся в Институт высших исследований, где работал до часа дня, потом шел домой. Мне рассказывали, что однажды произошло дорожное происшествие (машина врезалась в дерево), когда водитель в красивом старике в черной вязаной шапочке, натянутой на длинные седые волосы, внезапно узнал Эйнштейна. После обеда он на несколько часов укладывался в постель. Затем пил чай, работал, разбирал почту или принимал посетителей и обсуждал с ними научные проблемы. Ужинал он между половиной седьмого и семью часами. Потом снова работал или слушал радио (телевизора в доме не было), иногда принимал друзей. Ложился он, как правило, между одиннадцатью и двенадцатью. По воскресеньям в полдень слушал обзор новостей, передачу, которую вел Говард К. Смит. Гостей в это время он никогда не принимал. Днем в воскресенье Эйнштейн отправлялся погулять или выезжал с кем-нибудь из друзей на их машине. Изредка ходил на концерт или в театр и крайне редко — в кино. Иногда Эйнштейн посещал семинар в Пальмеровской лаборатории, вызывая своим появлением смятение, которое я описал раньше. В те годы он уже не играл на скрипке, но ежедневно импровизировал на пианино. Тогда же он бросил курить любезные его сердцу трубки [D1].

С 1945 г. Эйнштейн, которому исполнилось 66 лет, жил под одной крышей с сестрой Майей, падчерицей Марго и Элен Дюкас, которая ведала всем, от почты до прислуги. Вскоре после окончания войны Майя стала готовиться к переезду в Европу к мужу Паулю, жившему в семье Бессо в Женеве [E1]. Этому не суждено было осуществиться. В 1946 г. она перенесла инсульт и остаток жизни была прикована к постели. Ее состояние постепенно ухудшалось, к концу она не могла говорить, хотя сохранила ясность ума. Каждый вечер после ужина Эйнштейн поднимался к сестре, которую очень любил, и читал ей. Майя умерла в доме на Мерсер-стрит в июне 1951 г.

Физика оставаясь в центре интересов Эйнштейна и в последнее десятилетие жизни, когда он (как я уже рассказывал) сконцентрировал внимание исключительно на построении единой теории поля и на рассмотрении фундаментальных вопросов квантовой теории. За это время он опубликовал восемь работ по единой теории поля, статью для журнала «Dialectica» [E2], написанную по настоянию Паули, в которой он изложил свои взгляды на квантовую механику, и свой, как выразился, некролог — интереснейшую работу «Автобиографические заметки» [E3]. Изредка проводил семинары, где рассказывал о своей работе. Чтобы избежать наплыва любопытных, особенно репортеров, объявления о таких семинарах передавались только устно. Выступления Эйнштейна отличались ясностью, но оставляли ощущение незавершенности, потусторонности. То были дни поразительного прогресса в квантовой электродинамике и неожиданных открытий новых частиц, дни, когда разрыв между физикой Эйнштейна и физикой молодого поколения все увеличивался.

Никогда Эйнштейн так не окунался в политические проблемы и в общественную деятельность, как после второй мировой войны. «Выиграна война, а не мир»,— сказал он в выступлении в декабре 1945 г. [E4]. Он считал, что послевоенный мир опасно нестабилен, что необходимы новые формы государственного правления. «Первая атомная бомба уничтожила не только Хиросиму. Она взорвала и наши устаревшие, доставшиеся от прежних времен политические взгляды» [E5]. Еще в сентябре 1945 г. он предложил «...единственный способ спасения цивилизации и человечества — создание мирового правительства, обеспечивающего безопасность наций, основанную на законе» [E6]. Эйнштейн считал, что такое правительство должно быть вправе принимать решения, имеющие обязательную силу для государств-членов. К ООН он относился скептически именно потому, что у нее нет таких полномочий. Мировое правительство осталось той темой с вариациями, к которой он возвращался снова и снова. В 1950 г. Эйнштейн повторил то же в послании «О моральных обязательствах ученого»: «Человечество может спасти только создание основанной на законе наднациональной системы, которая исключила бы применение грубой силы» [E7]. Он верил, что именно к этому нужно стремиться, даже если окружение враждебно относится к таким идеалам: «Внутренне свободного и порядочного человека можно уничтожить физически, однако его нельзя превратить в слепое орудие или поработить» [E7]. Несколько раз (и об этом много говорилось в то время) он призывал к гражданскому неповиновению[1]). «Я убежден, что задача установления мира во всем мире на наднациональной основе будет реше-

[1]) Эйнштейн говорил об этом в письме одному из лиц, отказывавшихся служить в армии по соображениям совести [N1, с. 542], а также в письме школьному учителю Уильяму Фрауэнглассу, которого вызвали для рассмотрения его дела в комиссию по антиамериканской деятельности [N1, с. 546].

на, если применить в более широких масштабах методы Ганди» [E8]. «Как может меньшинство интеллектуалов бороться с этим злом [подавлением свободы преподавания]? Откровенно говоря, я вижу только революционный путь отказа от сотрудничества в духе Ганди» [E9]. В мрачный период маккартизма такие заявления были редкостью.

Эйнштейн считал также, что необходимо «расширять использование атомной энергии в интересах всего человечества, распространять информацию об атомной энергии... с тем чтобы осведомленные граждане могли сознательно направлять свои действия, служащие их интересам и интересам всего человечества». Это было записано в уставе недолго существовавшего Чрезвычайного комитета ученых-атомщиков, председателем которого был Эйнштейн[2]). В 1954 г. он присоединился к подавляющему большинству ученых-атомщиков, публично осудивших действия правительства США в деле Оппенгеймера, обвинявшегося в антигосударственной деятельности.

Насколько мне известно, политические взгляды Эйнштейна в послевоенные годы полностью соответствовали тем заявлениям, которые упоминались выше. Читателя, интересующегося его взглядами и деятельностью, отсылаю к книге «Эйнштейн о мире» [N1, с. 542], где на сотнях страниц приведены документы, свидетельствующие о том, сколько усилий потратил Эйнштейн в последние годы жизни, пытаясь разрешить проблемы, связанные с будущим человечества. Некоторые из его предложений были нереальными, другие — преждевременными. Однако очевидно, что их автором был человек ясного ума и непоколебимых убеждений.

Необходимо сделать еще два замечания, имеющие отношение к политическим взглядам Эйнштейна. Немцев он так и не простил: «Немцы уничтожали моих братьев-евреев в Европе, и я не желаю иметь с ними никаких дел... Это не относится к тем, кто оставался тверд в своих убеждениях, насколько это было возможно в тех обстоятельствах» [E10]. Такими людьми, по его мнению, в частности, были Отто Ган, Макс Лауэ, Макс Планк и Арнольд Зоммерфельд.

Эйнштейн был предан делу создания Израиля, хотя часто публично критиковал его правительство. О евреях он говорил «мой народ». Мне кажется, что чувство национального самосознания проявлялось у него с годами все больше и больше. Он, видимо, за всю жизнь так и не нашел места, которое стало бы его настоящим домом, но свое «племя» он нашел.

В последние годы жизни Эйнштейн много болел.

В течение нескольких лет у него повторялись приступы боли в верхней части брюшной полости. Обычно они продолжались два, сопровождались рвотой и повторялись каждые несколь-

[2]) Комитет был основан в августе 1946 г. Помимо Эйнштейна в него входили Р. Бэчер, Г. Бете, Э. Кондон, Т. Хогнесс, Л. Силард, Г. Юри и В. Вайскопф. Комитет прекратил свою деятельность в январе 1949 г.

ко месяцев. Осенью 1948 г. хирург Рудольф Ниссен[3]), которого пригласили для консультации, обнаружил у него абдоминальное новообразование размером с грейпфрут. Он предложил сделать пробную лапаротомию, на что Эйнштейн согласился. Двенадцатого декабря он поступил в Еврейский госпиталь в Бруклине. Во время операции доктор Ниссен обнаружил, что новообразование является аневризмой брюшной аорты. Стенки аневризмы были плотными, без изъязвлений; удаление ее противопоказано. Эйнштейн пробыл в больнице, пока не затянулись швы. В записях медсестер говорится о том, что на вопросы о самочувствии он неизменно отвечал, что чувствует себя хорошо. Тринадцатого января 1949 г. он вышел из больницы.

Примерно через полтора года выяснилось, что аневризма растет. С тех пор «...все окружавшие его знали ... о висящем над ним дамокловом мече. Он тоже знал и ждал спокойно, с улыбкой» [D2]. Восемнадцатого марта 1950 г. Эйнштейн поставил подпись под завещанием. Душеприказчиком он назначил своего друга, экономиста Отто Натана. Натан и Элен Дюкас назначались распорядителями всех писем, рукописей и авторских прав с условием, что все бумаги в конце концов будут переданы университету Хебрю. По завещанию все его книги отходили Элен Дюкас, а скрипка — внуку Бернарду Цезару.

Среди наследников Эйнштейна были и его сыновья Ганс Альберт, в то время профессор в Беркли, и Эдуард, находившийся в лечебнице в Цюрихе. Их мать, Милева, умерла в Цюрихе 4 августа 1948 г. Я так и не составил о ней четкого представления. Из всех жизненных невзгод душевная болезнь Эдуарда была для нее, наверняка, самым тяжким испытанием. Она регулярно навещала «Тедэ» до конца своей жизни. Эдуард умер в больнице в 1965 г., Ганс Альберт — в Беркли в 1973 г.

Из событий последних лет жизни Эйнштейна выделю одно. Девятого ноября 1952 г. умер первый президент Израиля Хаим Вейцман. Правительство Израиля решило предложить пост президента Эйнштейну, который впервые узнал об этом из газеты «New York Times». Что произошло дальше, описано другом Эйнштейна, который был у него в тот вечер: «Около девяти часов принесли телеграмму... посла Израиля в Вашингтоне г-на Аббы Эбана. В вычурных выражениях в телеграмме подтверждалось сообщение, приведенное в газете, что вызвало переполох среди немногочисленных домочадцев. „Как это некстати, как некстати!“— приговаривал пожилой джентльмен, возбужденно бегая по комнате, что было совсем на него не похоже. Он думал не о себе, а о том, как избавить посла и правительство Израиля от неловкого положения, в которое поставит их его неизбежный отказ... Он решил не посылать телеграмму, а позвонить немедля в Вашингтон. В коротком разговоре с послом он почти униженно объяснил свое положение» [M1].

---

[3]) Здесь я использую частное сообщение д-ра Ниссена [N2].

Конец наступил в 1955 г.

В марте того года Эйнштейну представился случай вспомнить трех старых друзей. Он писал Курту Блюменфельду: «С опозданием благодарю тебя за то, что ты помог мне осознать мою еврейскую душу» [E11]. Он написал последние автобиографические наброски, которые были помещены в юбилейном выпуске «Schweizerische Hochschulzeitung», посвященном 100-летию Цюрихского политехникума [E12]. Там он написал о «потребности по крайней мере один раз в жизни выразить... благодарность Марселю Гроссману», другу, чьими конспектами он пользовался в студенческие годы, который помог ему получить место в патентном бюро, которому он посвятил докторскую диссертацию и вместе с которым написал первую работу по общей теории относительности с применением тензорного исчисления. В марте умер Мишель Бессо, еще один верный друг студенческих лет, позднее — коллега по патентному бюро, и первый человек, с которым Эйнштейн обсуждал специальную теорию относительности. Он написал семье Бессо: «Он лишь немного опередил меня, чуть раньше уйдя из нашего занятного мира» [E13].

Одиннадцатого апреля Эйнштейн в последний раз поставил свое имя под манифестом пацифистов (на этот раз составленным Бертраном Расселом), в котором содержался призыв ко всем государствам уничтожить атомное оружие [N1, с. 631].

Утром 13 апреля, в среду, израильский консул посетил Эйнштейна для того, чтобы обсудить с ним проект заявления, которое тот должен был зачитать по радио и телевидению по случаю предстоящей годовщины независимости Израиля. Черновик этого заявления [N1, с. 643—644] заканчивался следующими словами: «Ни один политической деятель, имеющий возможность принимать решения, не осмеливается пойти по единственно верному пути к прочному миру — обеспечению наднациональной безопасности, так как это означало бы его верную политическую смерть. Что же касается бушующих повсюду политических страстей, то они требуют жертв». Видимо, это были последние слова, которые Эйнштейн доверил бумаге.

В тот вечер дома с ним случился приступ. Аневризма прорвалась. Немедленно послали за Ги К. Дином, лечащим врачом Эйнштейна. Из Нью-Йорка в Принстон вызвали двух его друзей — Рудольфа Эрмана, который был врачом Эйнштейна в Берлине, и Густава Бакки, рентгенолога. В четверг из нью-йоркской больницы вызвали специалиста по операциям на сердце и аорте хирурга Франка Гленна. После консилиума Эйнштейн спросил у Дина, мучительная ли смерть его ждет. Возможно, точно сказать нельзя, ответили ему. Может быть, это произойдет в несколько минут, а может быть, будет тянуться часами или днями [D3]. «Боль он переносил стоически»,— сказал через несколько дней Дин [D4]. Эйнштейн возражал против уколов морфия и решительно отказался оперироваться. «Я уйду, когда сам того захочу. Искусственно продлевать жизнь — бездарно. Я сделал

свое, пора уходить. Я хочу уйти красиво» [D2]. В пятницу его перевезли в принстонскую больницу. В тот же вечер позвонили из Беркли его сыну Гансу Альберту, который тут же выехал к отцу и был в Принстоне во второй половине дня в субботу. «В субботу и воскресенье я довольно долго пробыл с отцом, которому явно приятно было мое присутствие»,— вспоминал Ганс Альберт [E14]. В субботу Эйнштейн позвонил домой, чтобы ему принесли очки. В воскресенье он попросил бумагу и ручку [D3]. В тот вечер он, казалось, просто отдыхал.

Альберта Росел, ночная сестра, была последней, кто видел Эйнштейна живым. Ночью 18 апреля в 1 ч 10 мин «миссис Росел заметила, что он дышит как-то не так. Она позвала другую сестру, которая помогла ей поднять изголовье кровати. Как только вторая сестра ушла, доктор Эйнштейн пробормотал что-то по-немецки. Затем, как вспоминает миссис Росел, „он вздохнул два раза и отошел“» [D4]. Было пятнадцать минут второго.

В 8 ч утра новость стала достоянием общественности. Вскрытие, произведенное тем же утром [1]), показало, что смерть наступила из-за разрыва стенки аневризмы. Позднее, в то же утро, в больницу приехал Герман Вейль, который вместе с доктором Дином встретился с журналистами.

В 14 ч тело было перевезено в похоронное бюро Матера, а оттуда, спустя полтора часа, в крематорий Эвинг в Трентоне, где собрались 12 близких Эйнштейну людей [S1]. Один из них произнес краткую речь, процитировав «Эпилог к „Колоколу“ Шиллера» Гёте. Сразу же после этого тело было кремировано, а пепел развеян в месте, которое сохранено в тайне.

Эпилог

Последний раз я видел Эйнштейна в декабре 1954 г.

Он плохо себя чувствовал и несколько недель не был в институте, где, как правило, проводил утром несколько часов. Собираясь уехать в отпуск, я позвонил Элен Дюкас и попросил ее передать профессору Эйнштейну наилучшие пожелания. Она пригласила меня зайти на чашку чая. Я, естественно, с радостью согласился. Войдя в дом, я поднялся на второй этаж и постучал в дверь его кабинета. Раздался тихий голос: «Войдите». Эйнштейн сидел в кресле, на ноги было наброшено одеяло, на коленях лежал блокнот. Он работал. Эйнштейн тут же отложил записи и поздоровался со мной. Мы приятно провели с полчаса, разговаривая не помню уж о чем. Затем мы попрощались, обменявшись рукопожатием. Подойдя к двери кабинета, до которой было шагов пять, я оглянулся. Эйнштейн сидел в кресле с блокнотом на коленях, с карандашом в руке, забыв обо всем.

Он снова работал.

---

[1]) Его производил д-р Томас С. Харви, извлекший при этом часть мозга, которая находится в городе Вестон, шт. Миссури [W1].

Глава 28. О ТЕНЗОРАХ, СЛУХОВОМ АППАРАТЕ И МНОГИХ ДРУГИХ ВЕЩАХ: СОТРУДНИКИ ЭЙНШТЕЙНА

Все основные работы написаны Эйнштейном без соавторов. Однако на протяжении жизни у него было множество сотрудников, больше 30 человек. Толпу Эйнштейн не любил, не любил он и преподавать, поэтому школы не создал. Тем не менее, он очень охотно обсуждал с другими проблемы физики, о чем так хорошо рассказывали работавшие с ним ученые во время принстонского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения Эйнштейна [W1]. Все четверо выступивших там ученых сотрудничали с ним в 30-е и 40-е годы и занимались разработкой ОТО и созданием единой теории поля, так как именно эти области находились в центре интересов Эйнштейна в то время. Все они были гораздо моложе Эйнштейна и работали с ним в те годы, когда происходило их становление как ученых.

Раньше дело обстояло несколько иначе. Кроме молодых физиков, которые уже тогда стремились работать с Эйнштейном, с ним сотрудничали ученые, принадлежавшие к его поколению, такие как Лауб, братья Габихт, Гроссман, Эренфест, Бакки, Мюзам и Толмен. Хотя Паули и был на 20 лет моложе, он уже успел прославиться к тому времени, когда писал совместно с Эйнштейном работу. Кроме того, поначалу (хотя теория относительности уже полностью поглотила внимание Эйнштейна) его интересовали и другие проблемы. К примеру, среди тогдашних работ, написанных в соавторстве с различными учеными, есть статьи прикладного характера, посвященные холодильным устройствам, слуховому аппарату, гиромагнетизму, проницаемости мембран. Похоже, что в молодости Эйнштейн получал больше удовольствия от физики, чем позднее.

Чтобы читатель лучше узнал Эйнштейна как физика, расскажем обо всех его сотрудниках[1]). В том и состоит цель этого дополнения. Материал изложен в виде кратких набросков, в которых рассказано, в какой области происходило сотрудничество

[1]) Насколько мне известно, список сотрудников Эйнштейна, приведенный ниже, полон. Я не включал сюда таких людей, как Бессо, с которым Эйнштейн часто обсуждал научные проблемы, но так и не написал ни одной совместной работы.

и как дальше складывалась судьба ученых, работавших с Эйнштейном [2]).

Иоганн Якоб Лауб. Родился в 1872 г. в Ягерндорфе, Австрия. Докторскую диссертацию защитил в ноябре 1906 г. в Вюрцбурге под руководством В. Вина. Лауб опубликовал статью о СТО еще в 1907 г. [L1]. В начале 1908 г. он написал Эйнштейну в Берн и попросил разрешения поработать с ним [L2]. В результате их сотрудничества были опубликованы две статьи об электродинамике весомой среды [E1, E2][3]). В 1910 г. Лауб написал первую крупную обзорную статью об экспериментальных основах СТО [L3]. Позднее он стал профессором физики в Ла-Плата, Аргентина. Затем поступил на службу в Министерство иностранных дел Аргентины и к моменту агрессии Германии против Польши в 1939 г. был послом Аргентины в Польше. Умер в 1962 г. во Фрибуре, Швейцария.

Вальтер Ритц. Родился в 1878 г. в Сионе, Швейцария. Докторскую диссертацию защитил в Геттингене в 1902 г. под руководством Фогта. С 1908 г., когда он открыл комбинационный принцип применительно к линейчатым спектрам,— приват-доцент в Геттингене. Не приняв СТО, считал, что необходимо отказаться от понятия поля, описываемого дифференциальными уравнениями в частных производных [P2, § 3]. Ритц и Эйнштейн опубликовали одну небольшую работу, написанную в апреле 1909 г. Эту работу можно включить в раздел, посвященный сотрудничеству, с большой натяжкой, так как она представляет собой краткую записку, в которой ученые сообщают, в чем они договорились не соглашаться друг с другом. Вопрос заключался в том, допустимы ли оба типа решений уравнений электромагнитного поля — с опережающим и запаздывающим потенциалом. «Ритц рассматривает ограничение в виде запаздывающих потенциалов как один из источников второго закона термодинамики, тогда как Эйнштейн считает, что необратимость имеет исключительно вероятностные основы» [R1]. Ритц, несомненно, одаренный ученый, прожил недолгую, отягченную болезнями жизнь. Умер в 1909 г. в Геттингене.

Братья Габихт. Иоганн Конрад родился в 1876 г., а Франц Пауль — в 1884 г. в Шафхаузене, Швейцария [4]). Конрад был одним из членов «Академии Олимпия» в Берне. В 1903 г. он получил докторскую степень по математике, потом стал школьным учителем сначала в Шиерсе (Граубюнден), а затем в Шафхаузене, где и умер в 1958 г. Пауль, по образованию инженер, открыл небольшую фабрику по производству электрического и

---

[2]) Об ученых, с которыми Эйнштейн работал в молодости, см. также [P1].

[3]) Эти работы обсуждаются в [P2, § 33, 35].

[4]) Подробно биографии Конрада и Пауля Габихтов приведены в публикациях [H1, R2] соответственно. Выражаю благодарность сотруднику госархива Шафхаузена Г. Либу за то, что он обратил мое внимание на эти издания.

акустического оборудования. Он умер в 1948 г. также в Шафхаузене.

После публикации краткого сообщения о флуктуациях напряжения в конденсаторе, «явлении, родственном броуновскому движению» [E3], написанного Эйнштейном в 1907 г., он заинтересовался вопросом возможности усиления малых напряжений. Эйнштейн предполагал применить для этого конденсатор переменной емкости, заряжаемый при низком напряжении и максимальной емкости, а затем разряжаемый при высоком напряжении и минимальной емкости на другой конденсатор. Этот процесс предполагалось повторять, используя систему последовательно включенных конденсаторов. Эйнштейн надеялся, что такая электростатическая схема может быть полезна при изучении радиоактивности. В декабре 1907 г. Эйнштейн написал Конраду, что Науль намерен собрать такую «установочку», как любовно называл ее Эйнштейн, в своей лаборатории. Эйнштейну очень нравилось его изобретение, и одно время он даже подумывал, не запатентовать ли его. «Мне очень любопытно, чего можно добиться с помощью такого метода,— я испытываю довольно большие надежды. Я передумал брать патент в основном из-за отсутствия интереса у производителей [?]» [E4]. Несколько месяцев спустя он опубликовал свое предложение [E5], а в 1908 г. попытался сам собрать такую «установочку» [E6]. В 1910 г. братья Габихт опубликовали результаты экспериментов, «выполненных совместно с А. Эйнштейном в лаборатории Цюрихского университета»; в этом эксперименте были использованы шесть конденсаторов переменной емкости [H2]. Эйнштейн продолжал живо интересоваться ходом этих работ и после того, как его стали волновать другие проблемы. В 1911 г. [E7] и в 1912 г. [E8] он писал из Праги Бессо о том, с каким успехом Науль демонстрировал свою установку в Берлине.

Быстрый прогресс техники усиления сигналов сделал осуществление идеи Эйнштейна нецелесообразным. После смерти Науля в 1948 г. Эйнштейн писал Конраду: «Память возвращает меня к давно ушедшим дням, когда я работал с твоим братом... над установочкой... Это было прекрасно, хотя ничего полезного и не получилось» [E9].

Людвиг Хопф. Родился в 1884 г. в Нюрнберге. В 1909 г. под руководством Зоммерфельда защитил докторскую диссертацию. Хопф встретился с Эйнштейном в сентябре 1909 г. на конференции в Зальцбурге и вскоре приехал в Цюрих, где работал ассистентом Эйнштейна в университете. Вместе они написали две статьи о классической статистической теории излучения, где, в частности, рассматривалась проблема динамики резонатора в поле излучения [E10, E11]. Хопф организовал встречу Эйнштейна с психоаналитиком Карлом Юнгом [S1]. В 1911 г. Хопф вслед за Эйнштейном переехал в Прагу. В конце того же года он получил должность ассистента в Высшей технической школе в Ахене и в дальнейшем стал профессором гидро- и аэродинамики. Он

добился крупных результатов в этой области, участвовал в подготовке «Справочника по физике» [H3] и был соавтором получившего высокую оценку учебника по аэродинамике [F1]. В 1934 г. Хопф лишился должности в Ахене из-за «неарийского происхождения». Вскоре после этого он переехал в Дублин, где стал профессором математики в Тринити-колледже. Умер в 1939 г. в Дублине.

Эмиль Ноэль. Ассистент Эйнштейна в Праге. О нем практически ничего не известно, кроме кратких сведений в биографической книге Филиппа Франка: «Ноэль... был сыном бедного еврейского крестьянина и мальчиком ходил за плугом. Он обладал спокойствием деревенского жителя...» [F2]. Я благодарен И. Ноэлю, проживающему в Хайфе, за предоставление дополнительных сведений о своем отце. С его позволения, процитирую выдержки из полученного мной письма [N1].

Эмиль Ноэль родился в чешской деревушке Мселли в семье крестьянина. В 1904 г. он поступил в немецкий университет в Праге, где получил образование на немецком языке. Пражский профессор экспериментальной физики Антон Лампа отговорил молодого человека специализироваться в области физики, «так как вся оригинальная работа уже выполнена, законы установлены и никаких крупных открытий не ожидается». Поэтому Ноэль занялся математикой, выбрав физику в качестве второй дисциплины. Переехав в Прагу, Эйнштейн по совету Лампы взял Ноэля своим ассистентом. Какими научными проблемами занимался Ноэль дальше — неизвестно. «Многие часы, проведенные с Эйнштейном в его кабинете, его мировоззрение и характер оказали значительное влияние на моего отца... Ему очень нравилась первая жена Эйнштейна, и он сожалел об их разводе». Диссертацию Ноэль защитил в 1912 или в 1913 г. После возвращения Эйнштейна в Цюрих Ноэль стал учителем математики в Вене, где оставался до 1938 г., до «аншлюсса» (присоединения Австрии к Германии). С 1938 по 1940 г. он был учителем, а затем директором гимназии Чавес, единственной оставшейся в Вене средней школы, где могли учиться еврейские дети. В 1942 г. Ноэль был интернирован и содержался в Терезиенштадте (Терезине). В опубликованных позднее материалах говорится, что в лагере он активно занимался просветительской работой. После того как вся его семья погибла в Терезине, он добровольно присоединился к своей сестре, когда ее отправляли в лагерь уничтожения. Письма Э. Ноэля сыну хранятся в мемориальном архиве Яд ва-Шем в Иерусалиме. Эйнштейн пытался помочь Ноэлю, но безуспешно [E12].

Отто Штерн. Родился в 1888 г. в Зорау, Верхняя Силезия (сейчас Зоры, Польша). В 1912 г. получил докторскую степень по физической химии в Бреслау под руководством Отто Сакура. Штерн приехал в Прагу к Эйнштейну на свои средства и последовал за ним в Цюрих, когда тот получил должность в политехникуме. Эйнштейн со Штерном попытались (но без успеха) ин-

терпретировать аномальное поведение удельной теплоемкости газов при низких температурах [E13]. При помощи Эйнштейна Штерну удалось получить в 1913 г. должность приват-доцента в Цюрихе. В 1914 г. он переехал во Франкфурт, где в 1920—1922 гг. проводил опыты вместе с Герлахом. В 1933 г. в Гамбурге он установил наличие у протона аномального магнитного момента. После прихода к власти нацистов Штерн уехал из Германии в США, где стал профессором физики в Техническом институте Карнеги (ныне университет Карнеги — Меллона) в Питтсбурге. В 1944 г. получил Нобелевскую премию по физике за 1943 г. «за вклад в разработку метода молекулярных пучков и открытие магнитного момента протона». После выхода на пенсию в 1946 г. попеременно работал то в Беркли, то в Цюрихе. Когда мы с Йостом приехали к нему в Беркли в начале 60-х годов, Штерн со слезами на глазах рассказывал о прекрасных днях совместной работы с Эйнштейном в Праге (см. также [S1, с. 215]). Умер в 1969 г. в Беркли.

Марсель Гроссман. Родился в 1878 г. в Будапеште. Сокурсник Эйнштейна по Цюрихскому политехникуму в 1896—1900 гг. Докторскую диссертацию защитил в 1902 г. в Цюрихе под руководством Фидлера. Гроссман и его отец сыграли решающую роль в назначении Эйнштейна в Бернское патентное бюро. В 1905 г. Эйнштейн посвятил свою диссертацию Гроссману-младшему. Сотрудничество Эйнштейна с Гроссманом подробно обсуждалось в гл. 12. Умер в 1936 г. в Цюрихе. Эйнштейн с благодарностью вспомнил Гроссмана в своей последней автобиографической работе — «Автобиографических набросках»[5]) [E14].

Адриан Даниэль Фоккер. Родился в 1887 г. в Бейтензорге, Нидерландская Вест-Индия (ныне Богор, Индонезия). В 1913 г. защитил в Лейдене под руководством Лоренца диссертацию, посвященную броуновскому движению электронов в поле излучения [F3]. Эта работа привела к уравнению Фоккера — Планка для гауссовых марковских процессов. Фоккер работал с Эйнштейном в Цюрихе в зимний семестр 1913—1914 гг. Их работа, посвященная теории гравитации Нордстрёма, обсуждалась в § 13.2 [E15]. Позднее Фоккер написал ряд статей по теории относительности, а также учебник по СТО на голландском языке. Был куратором фонда Тейлора в Гарлеме и одновременно профессором Лейденского университета. Известен также как страстный пропагандист 31-тональной музыки и борец за чистоту голландского языка. Умер в 1972 г. в Беекбергене, Нидерланды.

Вандер Йоханнес де Хааз. Родился в 1878 г. в Лисе, Нидерланды. Диссертацию защитил в 1912 г. в Лейдене под руководством Камерлинг-Оннеса. Вскоре после получения степени де Хааз с женой (урожденной Гертрудой Любертой Лоренц, старшей из трех детей Г. А. Лоренца) приехал в Берлин, где

[5]) Более подробно о жизни Гроссмана можно прочитать в [K1, S2].

работал сначала в лаборатории Анри дю Буа, а затем в Физико-техническом институте с Эйнштейном. Там они открыли эффект Эйнштейна — де Хааза, о котором шла речь в § 14.2. В 1925 г. де Хааз сменил Камерлинг-Оннеса на его посту в Лейдене. Успешно и много работал в области физики низких температур. Вышел в отставку в 1948 г. Умер в 1960 г. в Бильтховене, Нидерланды.

Яков Громмер. Родился в Брест-Литовске, который в год рождения Громмера (когда он родился, мне неизвестно) принадлежал России, а с 1919 по 1939 г.— Польше (в течение некоторого времени у Громмера был польский паспорт), ныне Брест, СССР. В молодости Громмер изучал исключительно талмуд[6]). Неутолимый интерес к математике привел его в Геттинген. По словам Элен Дюкас, по приезде в Германию Громмер говорил только на идиш. В Геттингене «им сразу же заинтересовались математики. В поразительно короткий срок он не только приобрел глубокие познания в математике, но и написал диссертацию, которую специалисты признали выдающейся... Если учесть, что он был обезображен болезнью и вообще физически слаб, то можно вообразить, какой талантливый это был человек»[7]) [E16].

Громмер работал с Эйнштейном в течение десяти лет, дольше, чем кто-либо другой. Первое упоминание о нем встречается в работе Эйнштейна 1917 г., посвященной космологии [E17]. Через шесть лет они напечатали статью, в которой показали, что теория Калуцы не допускает свободных от сингулярностей центрально-симметричных решений [E18]. Вскоре после этого Эйнштейн вновь упомянул Громмера в одной из своих работ [E19]. В 1925 г. Эйнштейн писал о том, что Громмер помогал ему «во всех вычислениях в области общей теории относительности» [E20]. В 1927 г. они написали статью о проблеме движения в ОТО (см. гл. 15) [E21]. Другое упоминание Эйнштейном имени Громмера [E22] указывает на то, что он оставался в Берлине по крайней мере до 1928 г. Средства, необходимые для продолжения им работы, частично поступали из Института им. кайзера Вильгельма [K2, т. 1, с. 154]. В Германии Громмер работал над подготовкой учебников по физике и математике на иврите для средних школ Палестины. Средства на ведение этих работ были выделены по распоряжению Вейцмана [R3]. В конце 20-х годов он принял предложение занять должность профессора в Минске. В 1929 г. он писал Эйнштейну из Минска, что некоторые лекции он читает по-русски, некоторые на идиш [G1]. Был избран членом Белорусской академии наук. Умер в 1933 г. в Минске.

Пауль Эренфест. Родился в 1880 г. в Вене. В 1904 г. в Вене защитил диссертацию под руководством Больцмана. Эрен-

---

[6]) Об этом сообщил Эйнштейн в записке в 1953 г. [E16] по просьбе комитета, готовившего книгу об истории евреев Брест-Литовска [C1].

[7]) Громмер страдал слоновой болезнью. Эйнштейн упомянул, что это делало его иногда раздражительным.

фест впервые встретился с Эйнштейном в Праге в 1912 г. Их прочная дружба длилась до смерти Эренфеста. В 1922 г. они написали работу об эффекте Штерна — Герлаха, из которой ясно видны трудности понимания природы этого явления до появления квантовой механики [E23]. В другой совместной статье, написанной годом позже, развиваются идеи, предложенные Эйнштейном в предыдущих работах о спонтанном и индуцированном испускании и поглощении излучения; здесь они применяются к эффекту Комптона [E24]. С 1913 по 1933 г. Эренфест был профессором теоретической физики в Лейдене. Покончил с собой в 1933 г., в Амстердаме. «Памяти Пауля Эренфеста» — одно из лучших и наиболее волнующих произведений Эйнштейна, посвященное памяти друга и «самого лучшего профессора из людей нашей профессии»[8]). Из этого некролога ясно видно, как волновали Эйнштейна судьбы физиков и физики.

Ганс Мюзам[9]). Родился в 1876 г. в Берлине. В 1900 г. Мюзам сдал последние экзамены в медицинском институте, открыл частную практику и одновременно начал работать в Еврейском госпитале в Берлине. Впервые он встретился с Эйнштейном в 1915 г. «В то время его имя было мало известно неспециалистам» [M1]. Г. Мюзам познакомился с Эйнштейном после случайной встречи Эльзы с супругами Мюзам. Мюзам сказал Эльзе, что он слышал об Альберте Эйнштейне и что она носит фамилию знаменитого человека. Эйнштейн заинтересовался семьей Мюзам и встретился с ними. Знакомство быстро переросло в дружбу. По воскресеньям мужчины отправлялись на прогулку и обсуждали проблемы физики, а также биологии и медицины [S1, с. 412].

В 1923 г. Эйнштейн и Мюзам совместно написали статью об экспериментальном определении проницаемости фильтров [E26]. Цель эксперимента состояла в том, чтобы оценить максимальный диаметр коллоидных частиц, при котором они еще способны проникать через жесткие мембраны. Мембрана представляла собой стенки трубки, открытый конец которой присоединялся к шлангу со сжатым воздухом. Пустая трубка помещалась в сосуд, заполненный эфиром (эфир был выбран потому, что он имеет малую капиллярную постоянную σ). Эфир заполнял поры мембраны, а сжатый воздух повышал давление в трубке до тех пор, пока при каком-то давлении p в эфире не начинали появляться пузырьки воздуха. Тогда $p = 4\sigma/d$. Здесь d — диаметр наибольшей поры и, следовательно, оптимальный диаметр коллоидной частицы. Авторы привели результаты опытов, в которых диаметр капилляров составлял 1 мкм.

---

[8]) Статья Эйнштейна об Эренфесте была первоначально опубликована в «Almanak van het Leidsche Studentencorps» в 1934 г. Ее перевод на английский приводится в одном из сборников работ Эйнштейна [E25].

[9]) Большую часть сведений о Мюзаме я почерпнул из его писем и писем его жены Карлу Зелигу. Эти письма сейчас хранятся в Историко-научном собрании центральной библиотеки Цюрихского политехникума.

Дружба крепла и постепенно стала занимать в жизни Эйнштейна большое место. «В течение долгого времени, когда мы жили в Берлине, Эйнштейн навещал нас каждый день» [M2]. После смерти мужа г-жа Мюзам писала Зелигу: «Знаете ли Вы, что однажды Эйнштейн сказал мне: „Сначала идет Ваш муж, потом — никого, а затем все остальные люди“?» [M3]. У меня есть основания считать, что в Берлине Мюзам был самым близким Эйнштейну человеком. Именно Мюзаму Эйнштейн рассказал о том, как в 12 лет он сочинял песни, прославлявшие господа, и распевал их по дороге в школу [S1, с. 15] (см. гл. 3). Однажды Мюзам спросил Эйнштейна, кем бы он стал, если бы родился в России в бедной еврейской семье. Эйнштейн ответил, что, вероятно, стал бы раввином [S1, с. 16]. Мюзам лучше, чем кто-либо иной, мог бы рассказать о тех личных причинах, которые заставили Эйнштейна после 1926 г. одиноко идти по выбранному им в физике пути.

Эйнштейн и Мюзам продолжали поддерживать контакты и после того, как Эйнштейн переехал в США, а Мюзамы бежали из Германии в Израиль. В письме, написанном Эйнштейном в 1942 г., сохранился дружеский тон: «Я превратился в одинокого старикана, известного главным образом тем, что не ношу носков, и демонстрируемого в особых случаях в качестве музейного экспоната» [E27]. В том же письме Эйнштейн пишет: «Сейчас я стал в работе еще большим фанатиком, чем прежде, и действительно надеюсь решить издавна занимающую меня задачу объединения физических полей. Мне, однако, кажется, что я лечу на воздушном корабле среди облаков, не понимая, как вернуться к реальности, т. е. стать на землю». Мюзам умер в Хайфе в 1957 г.

Лео Силард. Родился в 1898 г. в Будапеште. Для получения университетского образования приехал в Берлин. «Как только Силард понял, что по-настоящему его интересует только физика, он со свойственной ему прямотой пришел знакомиться с Эйнштейном... В том, что Эйнштейн вел семинар по статистической механике, заслуга в основном принадлежала Силарду... Этот семинар был уникальным событием для многих участников; в ходе его Силард, по-видимому, сформулировал основное направление своей диссертационной работы» [W2]. Диссертацию защитил в 1922 г. в Берлине под руководством М. Лауэ. До 1933 г. Силард работал в Институте им. кайзера Вильгельма в Берлине. С 1928 по 1933 г. он был также приват-доцентом университета.

Эйнштейн и Силард подали довольно много заявок на получение патентов: восемь в Германии (ноябрь 1927 г.— декабрь 1930 г.), шесть в Великобритании (декабрь 1927 г.— декабрь 1929 г.), одну в США (16 декабря 1927 г.), одну в патентное бюро в Берне, где раньше работал Эйнштейн (21 декабря 1928 г.), и одну в Нидерландах (27 декабря 1928 г.). Все, кроме двух заявок, поданных в Великобритании, были удовлетворены. Все

немецкие патенты были выданы после того, как Эйнштейн покинул страну. В 1927 г. Эйнштейн разрешил Силарду от его имени подать заявки на получение патентов за рубежом по некоторым из их совместных разработок [E28].

Подробно эти патенты рассмотрены в избранных трудах Силарда [F4; F5; K2, т. 2, с. 290; M4; M5]. Коротко, Эйнштейн и Силард поставили перед собой задачу создать бесшумный холодильник. Принципиальную новизну представлял собой так называемый насос Эйнштейна — Силарда, который был позднее описан Эйнштейном: «Переменным электрическим током генерируется направляющее магнитное поле, которое перемещает смесь жидких натрия и калия. Эта смесь совершает возвратно-поступательные движения и выполняет функции поршня насоса; таким образом, хладагент механически ожижается, а при его повторном испарении генерируется холод» [E29]. Изобретатели, видимо, получили за это устройство умеренное вознаграждение [S3], но явно не разбогатели. «Такие холодильники никогда не производились в промышленном масштабе, поскольку быстро стали развиваться механические холодильные устройства, работавшие почти бесшумно, и, кроме того, в них не было опасности утечки ядовитого хладагента; они были более надежны в эксплуатации» [F4]. Однако этому изобретению нашлось другое применение. «В течение многих лет казалось, что таким устройствам нет практического применения, однако с началом использования атомной энергии их полезность стала очевидна (сначала Силарду), и в дальнейшем их разработке уделялось много внимания» [F4].

В 1933 г. Силард уехал в Англию. В 1938 г. он поселился в Соединенных Штатах. Сначала работал в Колумбийском университете, а затем переехал в Чикаго, где участвовал в создании первого ядерного реактора. В 1946 г. он получил должность профессора биофизики в Институте Э. Ферми в Чикаго. «Работая в области биологии, Силарду удалось полностью реализовать свои возможности» [W2]. Он обладал сильно развитым общественным сознанием. Второго августа 1939 г. он и Юджин Вигнер обратились к Эйнштейну, с тем чтобы привлечь внимание президента Рузвельта к необходимости начала разработки атомного оружия. После этой встречи Эйнштейн набросал вариант письма. Подписанное им письмо было вручено Рузвельту 11 октября 1939 г. Позднее Силард предложил Эйнштейну написать президенту еще одно письмо с призывом ускорить проведение этих работ. Такое письмо было направлено 7 марта 1940 г. Умер в 1964 г. в Лахойа, Калифорния.

Рудольф Гольдшмидт[10]). Родился в 1876 г. в Нёйбуково (Мекленбург-Шверин), Германия. В 1898 г. получил диплом

[10]) Выражаю благодарность невестке Гольдшмидта Р. Голди, проживающей в Нью-Малден, Англия, и Хорсту Мельхеру из Потсдама за предоставление информации о патенте Эйнштейна и Гольдшмидта. Впервые о существовании этого патента я узнал из работ проф. Мельхера [M4, M5].

инженера. С 1899 по 1909 г. Гольдшмидт работал в Англии в различных электротехнических фирмах, в частности в компании «Westinghouse». По возвращении в Германию становится сначала приват-доцентом, а затем профессором в Дармштадте. Одним из его основных достижений было изобретение высокочастотной установки, примененной в радиотелеграфной линии связи между Германией и США. Эта линия связи начала работать 19 июня 1914 г.; первыми сообщениями, переданными по ней, стали телеграммы Вильгельма II и Вудро Вильсона.

В 20-е годы Гольдшмидт был директором промышленной исследовательской лаборатории в пригороде Берлина Моабите; имел много патентов. Один из них — немецкий патент 590783 — был выдан ему совместно с Эйнштейном. История его такова. Известная певица, знакомая Эйнштейна, стала плохо слышать. В 1928 г. Эйнштейн обратился к Гольдшмидту за помощью в разработке для нее слухового аппарата нового типа. Тогда же он послал знакомой певице следующий образец поэтического творчества:

Мыслителям невредно иногда
И техникой немного подзаняться.
С надеждой я вперед смотрю всегда:
Труды должны успехом увенчаться.

Патентная формула гласит: «Устройство, вид звуковоспроизводящего оборудования, в котором изменение электрического тока вызывает движение намагниченного тела путем магнитострикции». Патент был выдан 10 января 1934 г. Адрес Эйнштейна указан следующим образом: «Ранее проживал в Берлине, настоящее местопребывание неизвестно».

В 1934 г. Гольдшмидт эмигрировал в Англию и в последующие годы продолжал переписываться с Эйнштейном. Умер в 1950 г. в Борнмуте, Англия.

Корнелий Ланцош. (По рождению Корнель Лёви, позднее имя и фамилия стали писаться на венгерский лад.) Родился в 1893 г. в Секешфехерваре, Венгрия. В 1921 г. под руководством Рудольфа Ортвая защитил докторскую диссертацию в Сегеде. Ланцош начал переписываться с Эйнштейном в 1919 г. и ко времени начала сотрудничества с Эйнштейном написал более десятка работ по ОТО. В 1928 г. Эйнштейн написал Эрвину Маделунгу во Франкфурт-на-Майне с просьбой дать Ланцошу годичный отпуск (в то время он был ассистентом и приват-доцентом во Франкфуртском университете), для того чтобы вместе поработать над проблемами единой теории поля [E30]. Неделей позже Ланцош писал Эйнштейну: «Сейчас рассматривается вопрос о том, чтобы на мое место временно назначить молодого Бете» [L4]. В ноябре 1928 г. Ланцош приехал в Берлин и в течение года сотрудничал с Эйнштейном. Совместных работ у них не было. Эйнштейн сослался на работы Ланцоша в одной из своих статей о далеком параллелизме [E31]; через два года Ланцош написал на эту тему обзорную статью [L5].

Ланцош вернулся во Франкфурт в конце 1929 г. За время своей плодотворной научной деятельности он занимал должность профессора в университете Пердью (1931—1946 гг.), затем работал в промышленности, а после 1954 г. был профессором в Институте высших исследований в Дублине. Автор ряда книг, три из которых посвящены Эйнштейну, его творчеству и влиянию его идей [L6—L8]. Умер в 1974 г. в Будапеште.

Герман Мюнц. У меня есть лишь отрывочные биографические сведения о Мюнце. Он родился в Польше и позднее стал гражданином Германии [M6]. С Эйнштейном Мюнц начал переписываться с 1927 г. В 1928 г. Эйнштейн писал ему по поводу далекого параллелизма: «Эта столь естественная с математической точки зрения теория заслуживает серьезного рассмотрения, в особенности с учетом нынешнего отчаянного положения в теоретической физике» [E32, E33]. Мюнц приехал поработать с Эйнштейном в одно время с Ланцошем. Оба они получали стипендию от фонда Немецкого общества ученых [K2, т. 1, с. 36, 137][11]). Эйнштейн сослался на работы Мюнца в двух статьях о далеком параллелизме [E31]. В 1929 г. Мюнц стал профессором математики в Ленинградском университете, где в 1935 г. получил степень почетного доктора. В 1937 г. он был вынужден покинуть СССР, так как отказался принять советское гражданство [M7]. В 1938 г. приехал в Швецию. Эйнштейн обращался в несколько еврейских организаций с просьбой оказать Мюнцу финансовую помощь. Мне неизвестно, что с ним стало после 1938 г.

Вальтер Майер. Родился в 1887 г. в Граце, Австрия. Учился в Цюрихском политехникуме, а также в университетах Вены, Парижа и Геттингена. Диссертацию защитил в Вене в 1912 г., в 1926 г. стал приват-доцентом. В 1929 г. закончил работу над книгой по римановой геометрии, написал часть учебника по дифференциальной геометрии [D1].

После отъезда Ланцоша и Мюнца Эйнштейн обратился к Рихарду фон Мизесу с просьбой подыскать кого-нибудь, кто хотел бы поработать с ним. В декабре 1929 г. фон Мизес порекомендовал ему Майера [M8]. Вскоре после этого Майер начал работать с Эйнштейном, и их сотрудничество оказалось успешным. В январе 1930 г. Эйнштейн обратился в Прусскую академию наук с просьбой о выплате Майеру регулярного пособия [K2, т. 1, с. 36, 137]. В феврале 1930 г. они опубликовали первую статью о статических решениях в теории далекого параллелизма [E34]. Эйнштейн, видимо, скоро решил оставить Майера у себя, так как в июне того же года он спрашивал в письме берлинскому математику Людвигу Бибербаху, нельзя ли найти Майеру какую-нибудь работу [E35]. В октябре Эйнштейн представил в

---

[11]) Этот фонд, руководимый Фридрихом Шмидтом-Оттом, существовал с 1920 по 1934 г. Он служил для предоставления финансовой помощи перспективным молодым ученым и приват-доцентам, которые не могли без нее начать научную карьеру.

Прусскую академию наук статью, написанную вместе с Майером, в которой речь шла о новом варианте единой теории поля; эта теория основывалась на рассмотрении четырехмерного пространственно-временного континуума, имевшего в каждой точке касательное к нему пятимерное пространство [E36] (гл. 17). Майер (как и Элен Дюкас) сопровождал Эйнштейна во время его первой поездки в Калифорнию (в декабре 1930 г.— марте 1931 г.), так как Эйнштейн не хотел прерывать работу. Сразу же после возвращения они представили продолжение статьи, написанной в октябре 1930 г. [E37]. В декабре 1932 г. Эйнштейн с Майером закончили последнюю совместную работу, напечатанную в Германии. В ней рассматривались полувекторы и спиноры [E38]; это была также последняя статья Эйнштейна, напечатанная в трудах Прусской академии наук.

В октябре 1932 г. Эйнштейн был назначен профессором Института высших исследований и должен был приступить к исполнению своих обязанностей в октябре 1933 г. Во время переговоров с первым директором института Абрахамом Флекснером Эйнштейн в качестве условия принятия им предложения занять должность профессора настаивал на предоставлении там же работы Майеру. После того как все прочие вопросы были урегулированы к взаимному удовлетворению, Эйнштейн написал Флекснеру: «У меня осталось единственное пожелание, чтобы мой прекрасный сотрудник д-р В. Майер получил назначение, не зависящее от моей должности. До сих пор он очень страдал из-за того, что его способности и достижения не получили заслуженного признания. Ему нужно дать понять, что он получает должность за свои собственные заслуги, а не из-за меня» [E39].

В следующих двух работах Эйнштейна и Майера вновь рассматриваются полувекторы [E40, E41]. Написаны они были во время пребывания Эйнштейна в Ле-Кок-сюр-мер в Бельгии (§ 25.2). К тому времени, т. е. к весне 1933 г., вопрос о назначении Майера в Принстоне еще не был решен, и Эйнштейн писал Флекснеру о том, что следует тщательно подбирать людей, которые будут давать отзыв о Майере [E42]. Из следующего письма Флекснеру видно, что, когда Эйнштейн хотел, он вполне мог действовать настойчиво: «Вы, видимо, уже узнали из газет, что я согласился занять кафедру в Мадридском университете... Учитывая характер моих отношений с правительством Испании, считаю своим долгом написать Вам о своем ассистенте, профессоре В. Майере. Правительство Испании предоставило мне право рекомендовать одного математика, который получил бы должность профессора и работал под моим непосредственным руководством. Я очень высоко ценю способности профессора Майера не только как моего сотрудника, но и как самостоятельного ученого-математика, добившегося ценных и важных результатов, и он по праву сможет занять эту профессорскую должность. Он не стал бы просить меня рекомендовать его, если бы не считал, что его недооценивают, предлагая в Вашем институте должность экстраор-

динарного профессора с окладом, который не соответствует его заслугам и потребностям. Вследствие этого я оказался в трудном положении: я должен либо рекомендовать его в Испанию, либо справиться у Вас, нельзя ли предоставить ему должность профессора. Это единственный способ оставить его в Вашем институте и дать возможность сотрудничать со мной. Я бы очень и очень сожалел, если бы лишился его ценной помощи, так как это вызвало бы некоторые трудности и в моей работе. Кроме того, потеря В. Майера была бы ощутимой утратой для Вашего института» [E43].

Насколько большое значение Эйнштейн придавал сотрудничеству с Майером, видно также из ответа на письмо, в котором Флекснер предлагал, чтобы Майер приехал в Принстон на несколько недель раньше Эйнштейна. Эйнштейн писал: «Это сильно нарушит ход нашей совместной работы... так как мы будем оторваны друг от друга в течение целого месяца...» [E44].

Эйнштейн настоял на своем, и Майер получил постоянную должность, именовавшуюся «ассистент»; это было единственное назначение такого рода за всю историю института. Результатом сотрудничества Эйнштейна с Майером в США была одна статья, последняя из работ, посвященных полувекторам [E45]. После 1934 г. Майер вернулся к своим исследованиям в области «чистой» математики. Как мне кажется, он больше не хотел принимать участие в разработке единой теории поля и считал, что его карьера будет более удачной, если он займется самостоятельными исследованиями. Я знал его в последние годы жизни; это был мягкий и застенчивый человек, занимавший кабинет на третьем этаже Фалд-холла. Умер в 1948 г. в Принстоне.

Ричард Чейс Толмен. Родился в 1881 г. в Уэст-Ньютоне, шт. Массачусетс. В 1940 г. защитил диссертацию в области физической химии под руководством Артура Нойеса. С 1922 г. профессор Калифорнийского технологического института. Автор двух книг по теории относительности [T1, T2]. Во время первого приезда Эйнштейна в Калифорнию Толмен вместе с Эренфестом и Подольским занимался исследованием гравитационного поля, создаваемого светом [E46]; вместе с Эйнштейном и Подольским написал, мягко говоря, неудачную работу о проблеме измерений в квантовой механике [E47]. Умер в 1948 г. в Пасадене, Калифорния.

Виллем де Ситтер. Родился в 1872 г. в Снееке, Нидерланды. Диссертацию защитил в Гронингене под руководством Якобуса Каптейна. В 1917 г. предложил «Вселенную де Ситтера». С 1919 по 1934 г. директор Лейденской астрономической лаборатории. Во время второго приезда Эйнштейна в Калифорнию они вместе написали краткую статью [E48], где предлагается космологически плоская Вселенная (без космологического члена и с равным нулю давлением). Умер в 1934 г. в Лейдене.

Борис Подольский. Родился в 1896 г. в Таганроге, Россия. В 1913 г. эмигрировал в США. В 1928 г. защитил в Кали-

форнийском технологическом институте диссертацию под руководством Лауля Эпштейна. Подольский встретился с Эйнштейном в 1931 г. в Пасадене, где работал с ним и Толменом. В начале 30-х годов вместе с В. А. Фоком и П. Дираком работал в Харькове над квантовой электродинамикой. К моменту написания статьи Эйнштейна, Подольского и Розена [E49] (§ 25.3), т. е. в 1934—1935 гг., работал в Институте высших исследований. В этой статье использовался термин *волновая функция*. Я уверен, что Эйнштейн сам не писал эту статью, так как он неизменно употреблял выражение *пси-функция*. Натан Розен подтвердил, что эта статья была написана Б. Подольским. Позднее Подольский стал профессором университета Ксавье в Цинциннати [D2]. Умер в Цинциннати в 1966 г.

Натан Розен. Родился в 1909 г. в Бруклине, шт. Нью-Йорк. В 1932 г. защитил диссертацию в Массачусетсском технологическом институте. Розен писал магистерскую диссертацию о далеком параллелизме и приехал в Принстон, чтобы заниматься теоретической молекулярной физикой [12]). В Принстоне он обратился к Эйнштейну с просьбой высказать мнение о его магистерской диссертации. За этой встречей последовал период сотрудничества. В 1934—1935 гг. Розен был сотрудником Института высших исследований. Первой совместно написанной статьей была статья Эйнштейна, Подольского и Розена, основная идея которой предложена Розеном. Через два месяца вышла еще одна работа о свободных от сингулярностей решениях при наличии гравитационного и электромагнитного полей [E50]. В 1936 г. они напечатали краткое сообщение о проблеме двух тел в ОТО [E51], а в 1937 г.— статью о цилиндрических гравитационных волнах [E52].

Работая над этой последней проблемой, Эйнштейн на какое-то время пришел к выводу, что строгие релятивистские уравнения поля не допускают существования гравитационных волн [I1; S2, с. 215—216]. Позднее он нашел ошибку в рассуждениях и направил окончательный вариант рукописи в журнал «Physical Review». Рукопись была возвращена ему вместе с пространной запиской рецензента, в которой тот просил разъяснений. Эйнштейн возмутился и написал редактору, что протестует против ознакомления коллег с его работой до публикации [E53]. Редактор вежливо ответил, что рецензированию подвергаются все статьи, посылаемые в этот журнал, и выразил сожаление по поводу того, что Эйнштейн, видимо, не был знаком с этим правилом [T3]. Эйнштейн направил свою статью в «Journal of the Franklin Institute» и, не считая краткого опровержения [E54], никогда больше не печатался в «Physical Review».

Окончательный вариант статьи о гравитационных волнах был закончен в 1937 г. К тому времени Розен работал в Советском

---

[12]) Выражаю благодарность Натану Розену за рассказ о себе.

Союзе, где Эйнштейн помог ему найти временную должность. Эйнштейн написал Вячеславу Михайловичу Молотову, в то время Председателю Совета Народных Комиссаров, прося оказать помощь Розену в его начинаниях [E55]. Видимо, В. М. Молотов ответил уважаемому профессору, так как вскоре Эйнштейн письменно поблагодарил его за помощь [E56]. С 1952 г. Розен — профессор Техниона в Хайфе.

Густав Бакки. Родился в 1880 г. в Лейпциге. Бакки, специализировавшийся в рентгенологии, встретился с Эйнштейном в Берлине во время лечения падчерицы Эйнштейна Ильзе Кайзер-Эйнштейн. Их семьи подружились после того, как тот и другой переехали в США. В 1936 г. 27 октября Эйнштейн и Бакки получили американский патент № 2058562 на фотоэлектрическое устройство. Находящийся в передней части фотокамеры фотоэлемент наводится на фотографируемый объект и автоматически перемещает перед объективом камеры экран с изменяющейся прозрачностью. Умер в 1963 г. в Нью-Йорке.

Леопольд Инфельд. Родился в 1898 г. в Кракове. В 1921 г. защитил в Кракове диссертацию под руководством Ладислава Натансона. В студенческие годы Инфельд однажды навестил Эйнштейна в Берлине [I1], а с 1927 г. стал с ним переписываться. В 1934 г. Эйнштейн написал предисловие к научно-популярной книге Инфельда [E57]. Инфельд был сотрудником Института высших исследований в 1936—1938 гг. и написал вместе с Эйнштейном три статьи [E58—E60] о проблеме движения в ОТО; первая из этих статей — хорошо известная работа Эйнштейна, Инфельда и Хофмана, упоминавшаяся в гл. 15. В 1938 г. Эйнштейн и Инфельд опубликовали научно-популярную книгу «Эволюция физики», которая должна была помочь Инфельду материально [E61]. Инфельд рассказал об Эйнштейне в автобиографической книге «Поиск». Эйнштейн отнесся к ней без энтузиазма. «Не следует делать чего-либо такого, что может разрушить хрупкий мостик доверия между людьми» [E62]. С 1938 по 1950 г. Инфельд был профессором университета Торонто, а с 1950 г. до конца дней — профессором Варшавского университета. Умер в 1968 г. в Варшаве.

Банеш Хофман. Родился в 1906 г. в Ричмонде, Англия. В 1929 г. Хофман под руководством Веблена начал работать над проективной теорией относительности. Диссертацию защитил в Принстоне в 1932 г. под руководством Веблена. Сотрудник Института высших исследований в 1935—1937 гг. Хофман — соавтор упоминавшейся выше работы, написанной вместе с Эйнштейном и Инфельдом [E58]. С 1952 г. был профессором в Куинс-колледже в Нью-Йорке. Автор прекрасной биографии Эйнштейна [I14]; совместно с Элен Дюкас опубликовал сборник высказываний Эйнштейна [D3][13]).

[13]) Настоятельно призываю познакомиться с воспоминаниями Хофмана, Баргмана, Бергмана и Страуса, опубликованными в [W1].

Питер Габриель Бергман. Родился в 1915 г. в Берлине. Диссертацию защитил в 1936 г. в Праге под руководством Филиппа Франка, рекомендовавшего его Эйнштейну. Бергман работал с Эйнштейном с 1936 по 1941 г. Вместе они опубликовали две статьи о пятимерном объединении электромагнетизма и тяготения (теория Калуцы — Клейна); вторая работа была написана при участии Баргмана [E63, E64]. Эйнштейн написал предисловие к учебнику Бергмана по теории относительности [E65]. С 1950 г. Бергман — профессор университета в Сиракузах, шт. Нью-Йорк.

Валентин Баргман. Родился в Берлине в русской семье в 1908 г. Диссертацию защитил в 1936 г. в Цюрихе под руководством Грегора Вентцеля. С 1925 г. гражданин Германии, лишен гражданства в 1934 г. Сотрудник Института высших исследований с 1937 по 1946 г. Баргман и Эйнштейн опубликовали вместе две работы; одна из них, написанная вместе с Бергманом, упоминалась выше [E64], в другой рассматривались бивекторы [E66][14]). [Бивекторами называются величины $T_{\mu\nu}(x_1, x_2)$, зависящие от пары пространственно-временных точек и преобразующиеся при общем преобразовании координат как произведение $A_\mu(x_1)B_\nu(x_2)$, где $A_\mu(x_1)$, $B_\nu(x_2)$ — обычные 4-векторные поля.] Баргман стал профессором университета в Питсбурге, а затем профессором математической физики в Принстонском университете.

Вольфганг Паули. Родился в 1900 г. в Вене. В 1921 г. защитил в Мюнхене диссертацию под руководством Зоммерфельда. Эйнштейн очень высоко отозвался [E68] об обзорной статье Паули [P2], посвященной теории относительности. С 1940 по 1964 г. Паули, уехав из воюющей Европы, работал в Институте высших исследований. В 1943 г. вместе с Эйнштейном написал статью [E69], в которой было показано, что любое повсюду регулярное и статическое решение уравнений гравитационного поля без источников, имеющее на больших расстояниях вид решения Шварцшильда, должно приводить к равной нулю шварцшильдовской массе. (Было также показано, что этот результат справедлив и в теории Калуцы — Клейна[15]).)

Естественно, в этом кратком комментарии невозможно воздать должное вкладу Паули в разработку теории относительности и релятивистской квантовой теории. Подробно труды Паули обсуждаются в [E71]. Умер в 1958 г. в Цюрихе.

Эрист Габор Страус. Родился в 1922 г. в Мюнхене. Был ассистентом Эйнштейна с 1944 по 1948 г. В начале периода их сотрудничества Эйнштейн усиленно занимался проблемой обобщений ОТО, не используя дифференциальную геометрию. В то же время он обсуждал такой подход с Паули. Два варианта та-

[14]) Эйнштейн позднее написал продолжение этой статьи [E67].

[15]) Это улучшенный вариант того результата, который Эйнштейн ранее получил самостоятельно [E70].

ких обобщений (которые Эйнштейн так никогда и не опубликовал) упоминаются в воспоминаниях Страуса [W1]. Не зная о результатах, полученных другими учеными, они совместно написали статью о влиянии расширения пространства на гравитационные поля отдельных звезд [E72]. Во второй совместной работе [E73] рассматривались асимметричные связности (см. гл. 17). В 1948 г. Страус защитил диссертацию в Колумбийском университете. В настоящее время он профессор математики в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе.

Джон Кемени. Родился в 1926 г. в Будапеште. Ассистент Эйнштейна в 1948—1949 гг. Кемени написал мне: «Когда Страус уехал [в 1948 г.] в Калифорнию, Эйнштейн начал подыскивать себе нового ассистента. Меня познакомили с ним через общих друзей... В то время Эйнштейн заканчивал подготовку к публикации результатов, полученных им в единой теории поля. Он сузил область поисков до примерно трех альтернативных вариантов теории и пытался выбрать один из них. После года работы Эйнштейн остановился на одном из вариантов, который и опубликовал. После этого, естественно, нужно было попробовать решить дифференциальные уравнения в частных производных. Ничего не могло быть дальше от моей специализации в математике, чем эта область! Поэтому я настоятельно рекомендовал Эйнштейну не продлевать срок моего назначения и найти настоящего специалиста» [K3][16]).

В 1949 г. Кемени получил степень доктора математики в Принстонском университете, где был назначен ассистентом профессора философии в 1951 г. В 1970 г. стал президентом Дартмут-колледжа.

Роберт Гарри Крейчнен. Родился в 1928 г. в Филадельфии. В 1949 г. защитил диссертацию в Массачусетсском технологическом институте под руководством Х. Фешбаха. Ассистент Эйнштейна в 1949—1950 гг. В настоящее время владелец консультативной фирмы.

Брурия Кауфман. Родилась в 1918 г. в Нью-Йорке. В 1947 г. защитила диссертацию в Колумбийском университете. Ассистент Дж. фон Неймана в Институте высших исследований в 1947—1948 гг. Ассистент Эйнштейна с 1950 г. до конца его жизни. (В марте 1955 г. Эйнштейн рекомендовал продлить ее контракт до июня 1956 г. [E74].)

Кауфман была последним сотрудником Эйнштейна. Вместе они написали две работы об асимметричных связностях [E75, E76]. Последняя из совместных работ была закончена Эйнштейном в январе 1955 г. После смерти Эйнштейна Кауфман и Курт Гёдель привели в порядок его бумаги, находившиеся в кабинете № 115 в Фалд-холле. В 1955 г. на конференции в Берне Кауфман подвела итог осуществления Эйнштейном его программы работ в области построения единой теории поля [K5].

[16]) Воспоминания Кемени приводятся в [K4].

Глава 29. КАК ЭЙНШТЕЙН ПОЛУЧИЛ НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ

Процедура присуждения Нобелевской премии по физике в Королевской шведской академии наук такова. Приглашения выдвигать кандидатов рассылаются Нобелевским комитетом в составе пяти человек, избираемым из членов Академии (в дальнейшем он будет именоваться просто Комитетом). Комитет изучает предложения и материалы, представленные на его рассмотрение, оформляет протокол, после чего большинством голосов решает, кого рекомендовать Академии. Затем эта рекомендация оформляется в виде доклада, где резюмируются все сделанные предложения и обосновывается принятое решение. Вначале это предложение ставится на голосование на секции физики Академии; затем по нему голосует пленарное заседание Академии, т. е. не только физики. Результаты голосования не всегда совпадают с рекомендацией Комитета. Так, в 1908 г. Комитет единогласно проголосовал за Планка, физическое отделение тоже, но Академия выбрала Липмана.

Случай с Планком проливает дополнительный свет на противоречивый характер квантовой теории в те далекие дни. «Эта кандидатура [кандидатура Планка] вызвала в Академии резкий отпор... После поражения 1908 г. у Комитета надолго пропала охота выдвигать кандидатуру Планка. Кроме того, к 1910 г. особенно ясно стали заметны как достижения, так и противоречия квантовой теории, поэтому вопрос о присуждении премии Планку был отложен в надежде на то, что эти противоречия удастся устранить» [N1].

Мне посчастливилось получить доступ к отчетам Комитета и письмам с предложениями кандидатуры Эйнштейна на присуждение Нобелевской премии. Пользуюсь случаем еще раз поблагодарить всех, кто предоставил мне эти материалы, в особенности профессора Бенгта Нагеля, который любезно отвечал на мои дополнительные вопросы.

Решения Академии почти всегда встречают одобрение физиков. Бывает, впрочем, что у многих (включая меня) брови лезут вверх от удивления. Но это не только неизбежно, но и несущественно для моего рассказа. Я буду обращать внимание на события, по-прежнему имеющие большой исторический интерес, рассказывать о научных суждениях ведущих физиков и о решениях весьма консервативного учреждения, пользующегося огромным авторитетом,— Нобелевского комитета.

Десятого ноября 1922 г. в Берлин по месту проживания Эйнштейна была доставлена телеграмма следующего содержания: «Вам присуждена Нобелевская премия по физике. Подробности письмом. Ауривиллиус». В тот же день телеграмма аналогичного содержания была направлена Бору в Копенгаген. Десятого же ноября профессор Кристофер Ауривиллиус, секретарь Шведской академии наук, написал Эйнштейну: «Как я уже сообщил Вам телеграммой, Королевская академия наук на своем вчерашнем

заседании приняла решение присудить Вам премию по физике за прошедший (1921) год, отмечая тем самым Ваши работы по теоретической физике, в частности открытие закона фотоэлектрического эффекта, не учитывая при этом Ваши работы по теории относительности и теории гравитации, которые будут оценены после их подтверждения в будущем» [A1]. Бору была присуждена премия по физике за 1922 г.

Эйнштейн тогда не получил ни телеграммы, ни письма, так как в это время вместе с Эльзой находился на пути в Японию. В сентябре М. Лауэ писал ему: «По сведениям, полученным мной вчера и не вызывающим сомнений, в ноябре могут произойти события, при которых желательно Ваше присутствие в Европе в декабре. Подумайте, стоит ли Вам ехать в Японию» [L1]. Но, несмотря ни на что, Эйнштейн отправился в поездку и вернулся только в марте 1923 г. Надо учесть, что предыдущие три года были для него довольно беспокойными (гл. 16). В январе 1919 г. он развелся с Милевой. Тогда же он пообещал ей отдать деньги, которые получит в случае присуждения Нобелевской премии. В 1923 г. вся сумма в размере 121 572 крон и 54 эре (около 32 тыс. дол. или 180 тыс. швейцарских франков по курсу 1923 г.) была переведена Милеве (частное сообщение Элен Дюкас). В июне 1919 г. Эйнштейн женился на Эльзе; в ноябре произошли события, связанные с известием об искривлении лучей света. В 1920 г. он и его работы подверглись нападкам со стороны определенных кругов в Германии. В 1921 г. он побывал в США и Англии; в начале 1922 г. посетил Францию. За несколько месяцев до отъезда Эйнштейна в Японию был убит Ратенау, и Эйнштейн с радостью покинул Германию, оставаться в которой было небезопасно. Видимо, известие о присуждении Нобелевской премии застигло его в пути; впрочем, точно неизвестно, где он получил это сообщение. В путевом дневнике Эйнштейна об этом ничего не говорится.

Десятого декабря 1922 г. посол Германии в Швеции Рудольф Надольны принял вместо Эйнштейна присужденную тому премию и на состоявшемся вечером того же дня в Стокгольме банкете произнес тост: «... [выражаю] радость нашего народа по поводу того, что вновь один из нас смог сделать что-то для всего человечества». Он выразил надежду на то, что «Швейцария, которая долгие годы давала [Эйнштейну] приют и возможность работать, присоединится к общей радости» [L2].

Из доклада, направленного Надольны спустя два дня в Министерство иностранных дел, видно, что он очень добросовестно подошел к сложной проблеме международных отношений. В ноябре 1922 г. представители Шведской академии наук обратились к нему с просьбой представлять интересы Эйнштейна. Швейцарский посол тут же запросил разъяснений, так как, по его сведениям, Эйнштейн являлся гражданином Швейцарии. Первого декабря Надольны послал запрос в Берлинский университет и 4 декабря получил телеграмму из Прусской академии наук: «От-

вет: Эйнштейн — гражданин рейха». Одиннадцатого декабря Министерство иностранных дел информировало посла о том, что Эйнштейн швейцарец. Тринадцатого января 1923 г. Прусская академия информировала Берлин о том, что 4 мая 1920 г. Эйнштейн был приведен к присяге в качестве государственного служащего и, следовательно, является гражданином Германии, так как только немецкие граждане имеют право находиться на государственной службе. В протоколе заседания Прусской академии наук от 18 января приводится мнение юрисконсульта о том, что Эйнштейн является гражданином Германии, но это не мешает ему также сохранять и швейцарское гражданство. Пятнадцатого февраля это решение было сообщено Эйнштейну. Двадцать четвертого марта Эйнштейн написал в Прусскую академию, что при вступлении в должность ему не ставилось условие поменять гражданство. Девятнадцатого июня Эйнштейн лично посетил советника министерства Роттенбурга и подтвердил, что его позиция в этом вопросе неизменна, добавив, что путешествует по швейцарскому паспорту. Заявление Эйнштейна по этому поводу, подготовленное им 7 февраля 1924 г. для включения в протоколы Прусской академии наук, в частности, гласит: «Роттенбург совершенно уверен, что мое избрание в Академию подразумевает принятие германского гражданства и что иного толкования быть не может. Я не возражаю против того, чтобы он имел такое мнение» [1]). Шестого апреля 1923 г. Ильза Эйнштейн написала в Нобелевский фонд в Стокгольме, что профессор Эйнштейн был бы благодарен, если бы медаль и диплом были высланы ему в Берлин, добавив, что если это предполагается проделать по дипломатическим каналам, то «обращаться следует в посольство Швейцарии, так как профессор Эйнштейн является швейцарским гражданином» [E1]. Конец этой истории положил барон Рамель, посол Швеции в Германии, который посетил Эйнштейна в Берлине и вручил причитающиеся ему медаль и диплом.

В марте 1923 г. Сванте Аррениус, один из членов Нобелевского комитета, в письме Эйнштейну предложил ему приехать в Швецию в июле, не дожидаясь декабря. В таком случае он мог бы присутствовать на заседании Скандинавского научного общества в Гётеборге, посвященном 300-летию основания этого города. Выбор темы лекции Аррениус оставлял на усмотрение Эйнштейна, но упомянул, что было бы желательно рассказать о теории относительности [A2]. Эйнштейн ответил согласием, хотя и отметил, что сам предпочел бы прочитать лекцию о единой теории поля [E2]. В жаркий июльский день одетый в черный редингот Эйнштейн прочел в гётеборгском «Зале юбилеев» лекцию об «основных идеях и проблемах теории относительности» [E3]; на лекции присутствовало около двух тысяч человек. После лекции Эйнштейн имел приятную беседу с присутствовавшим на

[1]) Все официальные документы, касающиеся этого дела, приводятся в [K1].

ней королем Густавом V [H1]. Позже Эйнштейн прочел еще одну более специальную лекцию в техническом институте Чалмерса, на которой присутствовало около 50 членов Научного общества.

А теперь посмотрим, как работал Нобелевский комитет.

Из протоколов заседаний Комитета видно, что Эйнштейн был в числе кандидатов на присуждение Нобелевской премии по физике каждый год с 1910 до 1922 г. (кроме 1911 и 1915 г.). Для облегчения своей задачи Комитет часто делит кандидатов на более узкие группы, чтобы выделить в каждой группе основного претендента и затем сравнивать только их. В приводимом ниже кратком изложении я указываю группу, в которую входил Эйнштейн, тех, кто был с ним в одной группе; курсивом выделено имя лауреата за тот год.

1910 г. Исследования теоретического или физико-математического характера. Гульстранд, Планк, Пуанкаре; *Ван-дер-Ваальс.*

Кандидатура Пуанкаре выдвигалась и в течение нескольких предыдущих лет. В 1910 г. в результате кампании, проведенной Миттаг-Леффлером, писем с предложением кандидатуры Пуанкаре было особенно много (было получено 34 таких письма). Среди них были и физики М. Бриллюэн, М. Кюри, Лоренц, Майкельсон и Зееман. Комитет в своем докладе отметил, что ни блестящие достижения Пуанкаре в области математики, ни его математико-философские сочинения (особо отмеченные многими, выдвигавшими его кандидатуру) не могут считаться физическими открытиями, если, конечно, «не вкладывать в это понятие особо широкий смысл».

1911 г. Эйнштейна нет в списке кандидатов; *Вин.*

1912 г. Теоретическая физика. Хевисайд, Лоренц, Мах, Планк; *Дален.*

Кандидатуру Лоренца, получившего в 1902 г. премию совместно с Зееманом, предложил Вин, считавший, что Лоренц должен поделить премию с Эйнштейном. Маха предложил Фердинанд Браун, поделивший Нобелевскую премию 1909 г. с Маркони; премия была присуждена им за практический вклад в разработку беспроволочного телеграфа. Кандидатуру Пуанкаре, который на этот раз попал в другую группу, выдвинул один Дарбу.

1913 г. Теоретическая физика. Лоренц, Нернст, Планк; *Камерлинг-Оннес.*

В других группах в число кандидатов фигурировали граф Цеппелин и братья Райт.

1914 г. Поисковые работы в области теоретической физики. Этвеш, Мах, Планк; *М. Лауэ.*

Кандидатуру Маха предложил Оствальд.

1915 г. Эйнштейна нет в списке кандидатов; *отец и сын Брэгги.*

1916 г. Молекулярная физика. Дебай, Кнудсен, Леман, Нернст; премия по физике за 1916 г. присуждена не была.

1917 г. Исследования, связанные с чрезвычайно плодотворными представлениями Планка в области квантовой гипотезы. Бор, Дебай, Нернст, Планк, Зоммерфельд; присуждение премии отложено.

Кандидатура Бора появилась впервые; она предложена Хвольсоном из Петрограда, который считал, что премия должна быть поделена между Бором и Кнудсеном.

1918 г. Квантовая физика. Бор, Пашен, Планк, Зоммерфельд; присуждение премии отложено: *премия за 1917 г. присуждается Баркла.*

1919 г. Теоретическая физика. Кнудсен, Леман, Планк; *Штарк*; *премия за 1918 г. присуждается Планку.*

1920 г. Математическая физика. Бор, Зоммерфельд; *Гийом.*

1921 г. То же, что в 1920 г.; присуждение премии отложено.

1922 г. Эйнштейн не отнесен к какой-либо из категорий; *9 ноября ему присуждается премия за 1921 г., а Бору — за 1922 г.*

Кто предлагал кандидатуру Эйнштейна? На каких основаниях? Какова была реакция Комитета?

Первым кандидатуру Эйнштейна предложил химик Вильгельм Оствальд; именно к нему безуспешно пытался попасть в ассистенты Эйнштейн в 1901 г. (гл. 3). Оствальд, лауреат Нобелевской премии по химии за 1909 г., был единственным, кто выдвинул кандидатуру Эйнштейна в 1910 г., и вновь повторил свое предложение в 1912 и 1913 гг. Во всех трех случаях он предлагал присудить премию за теорию относительности (здесь и далее, имеется в виду СТО; позднее будет особо указано, когда речь пойдет об ОТО). В 1910 г. он писал, что теория относительности является наиболее выдающимся достижением со времени открытия закона сохранения энергии [О1]. Во втором случае он подчеркнул, что теория относительности освобождает человека от оков тысячелетней давности [О2]. В третий раз он отметил, что данные работы имеют физическое, а не философское (как отмечалось другими) значение, и сравнил вклад Эйнштейна с заслугами Коперника и Дарвина [О3]. В 1912 г. помимо Оствальда кандидатуру Эйнштейна выдвинули также Э. Прингсгейм, К. Шефер и В. Вин; в 1913 г.— вновь Вин и Бернгард Наунин, немецкий профессор медицины. Во всех рекомендациях речь шла только о теории относительности, хотя Наунин упомянул и квантовую теорию. Как писал Прингсгейм: «Я уверен, что Нобелевскому комитету нечасто придется присуждать премии за работу подобного масштаба» [Р1].

В двух других случаях Вин предлагал разделить премию между Эйнштейном и Лоренцем (Шефер предлагал либо присудить премию Эйнштейну одному, либо разделить ее между Эйнштейном и Лоренцем). Необходимо еще раз (§ 7.5) процитировать второе письмо Вина, в котором он мотивировал предложенную им кандидатуру: «По поводу последних экспериментов с катодными и β-лучами я должен сказать, что не считаю

их результаты окончательными. Эксперименты очень тонки, и нельзя быть уверенным в том, что удалось устранить все источники ошибок» [W1]. Речь шла о проверке предложенного Эйнштейном соотношения, связывающего массу покоя, энергию и скорость свободного электрона. Как упоминалось в гл. 7, уже в 1908 г. некоторые экспериментаторы подтверждали справедливость соотношения Эйнштейна. Однако, как показывает письмо Вина, сомнения все же оставались; окончательно их удалось развеять лишь в 1915 г. Итак, одно из подтверждений справедливости теории относительности перестало оспариваться уже после того, как были выдвинуты кандидатуры 1912 г. Теория тонкой структуры спектральных линий, в которой используется соотношение Эйнштейна, также была предложена Зоммерфельдом позже, в 1916 г. Но тогда в результате создания ОТО ситуация коренным образом изменилась.

Прежде чем более подробно рассмотреть, кто выдвигал кандидатуру Эйнштейна позднее, хотелось бы рассказать о том, как Комитет отнесся к первым представлениям. В докладе 1910 г. предлагалось подождать экспериментального подтверждения «прежде чем принять принцип относительности и, в частности, присудить за него Нобелевскую премию. Это [т. е. необходимость подтверждения], по-видимому, является причиной, по которой кандидатура Эйнштейна выдвигается *лишь теперь* (курсив мой.— *А. П.*), хотя принцип, о котором идет речь, был предложен еще в 1905 г. и вызвал живейшее обсуждение». Комитет отметил также, что признание Эйнштейну принесли его работы по теории броуновского движения. О теории относительности говорилось примерно то же, что и в отчете 1910 г. «Безусловно, Лоренц в своих гипотезах был гораздо осторожнее Эйнштейна»,— отмечалось в отчете. В докладе 1913 г. упоминается, что теория относительности все с большим правом может претендовать на присуждение Нобелевской премии, хотя есть сомнения в том, что можно сравнивать Эйнштейна с Коперником или Дарвином. Комментарии я оставлю на потом; замечу лишь, что меня нисколько не удивляет отсутствие имени Лоренца в списке тех, кто рекомендовал дать Эйнштейну Нобелевскую премию за теорию относительности.

В течение следующих нескольких лет наступило закономерное затишье. Эйнштейн стал биться над ОТО и запутал всех, включая себя, гибридной теорией, в которой все было ковариантно, кроме уравнений гравитационного поля. В 1914 г. его кандидатуру выдвинули Паулин (относительность, диффузия, тяготение) и Хвольсон (достижения в ряде областей теоретической физики). В докладе за 1914 г. туманно говорится о том, что пройдет много времени, прежде чем будет сказано последнее слово о теории относительности Эйнштейна и о других его работах. В 1915 г. его кандидатура не выдвигалась. В 1916 г. имя Эйнштейна фигурировало лишь в одном предложении — Эренгафт предложил его кандидатуру за работы по теории бро-

уновского движения и за создание СТО и ОТО. В докладе отмечалось, что последняя теория еще не закончена.

Начиная с 1917 г. имя Эйнштейна стало появляться все чаще и чаще. А. Хааз предложил дать ему премию за создание новой теории тяготения, сославшись на объяснение смещения перигелия Меркурия. Варбург выдвинул кандидатуру Эйнштейна как автора работ по квантовой теории, теории относительности и гравитации. В третьем и последнем за тот год письме, направленном Пьером Вейсом из Цюриха, содержалось самое полное за все время изложение заслуг Эйнштейна [W2]. Впервые дана всесторонняя оценка его деятельности, которая названа «попыткой постичь неведомое». Сначала в письме описана работа Эйнштейна по статистической механике с акцентом на принцип Больцмана, затем говорится о двух постулатах СТО, постулате световых квантов, фотоэлектрическом эффекте и об исследованиях, посвященных проблеме удельной теплоемкости. В заключение перечислены экспериментальные работы. В докладе за 1917 г. говорилось о «знаменитом физике-теоретике А. Эйнштейне», высоко оценивалась его деятельность, однако возникло новое экспериментальное затруднение: Ч. Э. Сен-Джон в ходе опытов, проведенных в Маунт-Вилсопе, не обнаружил предсказываемого ОТО красного смещения. «Представляется, что теория относительности Эйнштейна, каковы бы ни были ее прочие достоинства, не заслуживает Нобелевской премии».

1918 г. Варбург и Эренгафт повторно выдвинули кандидатуру Эйнштейна; Вин и М. Лауэ независимо друг от друга предложили разделить премию за теорию относительности между Лоренцем и Эйнштейном; Эдгар Мейер из Цюриха перечислил теорию броуновского движения, теорию удельной теплоемкости и теорию гравитации; Стефан Мейер из Вены упомянул теорию относительности (далее под теорией относительности мы будем иметь в виду как СТО, так и ОТО). Доклад по существу идентичен тому, который был подготовлен год назад.

1919 г. Варбург, Лауэ и Э. Мейер повторили прошлогодние предложения. Планк предложил дать Эйнштейну премию за ОТО, так как «он первым шагнул дальше Ньютона» [P2]. Аррениус считал необходимым присудить премию за теорию броуновского движения. В число кандидатов также входили Перрен, Сведберг и Гюи, внесшие вклад в экспериментальные исследования броуновского движения. В докладе детально разобраны проблемы статистики, упоминались диссертация Эйнштейна и поправка к ней, а также работы по критической опалесценции. Однако, как отмечают авторы доклада, работы Эйнштейна по статистике не идут ни в какое сравнение с его работами по теории относительности и квантовой физике. «Научному миру покажется странным, что Эйнштейн получит премию за работы по статистической физике... а не за более крупные труды». Предложено подождать выяснения вопроса о красном смещении и... солнечного затмения 29 мая!

1920 г. Варбург повторил свое прежнее предложение; Вальдейер-Гарц из Берлина и С. Орнштейн из Утрехта предложили присудить премию за ОТО. В письме от 24 января 1920 г., подписанном Лоренцем, Джулиусом, Зееманом и Камерлинг-Оннесом, подчеркивалось создание теории тяготения; упор был сделан на объяснение смещения перигелия Меркурия и предсказание искривления лучей света. Авторы письма указали, что опыты по измерению красного смещения настолько тонки, что не следует торопиться с выводами. Эйнштейн, по их мнению, «занял место в первом ряду физиков всех времен». На Лоренца результаты экспедиций, наблюдавших солнечное затмение 1919 г., произвели огромное впечатление. За несколько месяцев до этого он писал Эренфесту об этих результатах как об «одном из наиболее блестящих подтверждений теории, каких когда-либо удавалось добиться» [L3].

Бор также предложил кандидатуру Эйнштейна, упомянув при этом теорию броуновского движения, теорию фотоэффекта и теорию удельной теплоемкости, но «прежде всего, и это самое главное»,— теорию относительности: «Это достижение, имеющее решающее значение для развития физических исследований» [B1].

К докладу за 1920 г. было приложено сообщение Аррениуса, подготовленное по просьбе Комитета, где излагались следствия ОТО. Аррениус указал, что результаты экспериментов по измерению красного смещения по-прежнему расходятся с теорией и что высказываются критические замечания по поводу измерений искривления лучей света, выполненных во время затмения 1919 г. Некоторые из этих критических замечаний действительно содержали рациональное зерно (более подробно об этом говорится в [W3]). Менее уместными были ссылки Аррениуса на объяснение смещения перигелия Меркурия, якобы даваемое другой теорией [2]). Комитет заключил, что пока теория относительности не может претендовать на присуждение премии.

1921 г. В краткой, выдержанной в решительных тонах записке Планк вновь выдвинул кандидатуру Эйнштейна. Того же мнения придерживались Хааз и Варбург. ОТО упоминалась в письмах В. Далленбаха (Баден), Эддингтона (Кембридж), Г. Яффе и Э. Маркса (Лейпциг), Г. Нордстрёма (Гельсингфорс), Ч. Уолкотта (Вашингтон) и О. Виннера (Лейпциг). Ж. Адамар (Париж) предлагал кандидатуры либо Эйнштейна, либо Перрена. Т. Лиман (Гарвард) писал о вкладе Эйнштейна в математическую физику. По словам Эддингтона, «Эйнштейн

---

[2]) Он ссылался на работу Э. Герке, одного из руководителей «Рабочего объединения немецких естествоиспытателей» (гл. 16). Еще в 1917 г. Эйнштейн указал, что теория Герке построена на противоречивых положениях [E4]. В 1921 г. Лепард предложил дать Герке Нобелевскую премию.

I. Эйнштейн за своим столом в патентном бюро, Берн, около 1905 г. (Архив Эйнштейна, воспроизводится с разрешения Библиотеки им. Н. Бора Американского физического института)

II. Обложка «Berliner Illustrirte» от 14 декабря 1919 г. Надпись гласит: «Альберт Эйнштейн — новый гигант мировой истории; его исследования, которые привели к полному перевороту в наших представлениях о природе, можно сравнить с открытиями Коперника, Кеплера и Ньютона»

III. Эйнштейн выступает с лекцией в Коллеж де Франс, 1922 г. (Архив Эйнштейна, воспроизводится с разрешения Библиотеки им. Н. Бора Американского физического института)

IV. Планк и Эйнштейн в Берлине 28 июня 1929 г., в день, когда Планк получил первую, а Эйнштейн вторую медаль им. Планка. (Воспроизводится с разрешения Библиотеки им. Н. Бора Американского физического института)

V. Эйнштейн в Калифорнии в начале 1931 г. (Он в панаме, подаренной ему в Бальбоа, куда заходил пароход.) Фото Ирвина Липпмана («Warner Bros. and First National»)

VI. Альберт Эйнштейн, Чарли Чаплин и Эльза Эйнштейн на премьере фильма «Огни большого города», Лос-Анджелес, 30 января 1931 г.

VII. Альберт и Эльза Эйнштейн у Большого каньона, 28 февраля 1931 г.

VIII. Альберт Эйнштейн с сестрой Майей, 1939 г. Стоящая спиной женщина — жена Томаса Манна. (Воспроизводится с разрешения миссис Дж. У. Брауп)

IXa. 1 октября 1940 г. Церемония принятия американского гражданства. Трентон, Нью-Джерси. Слева от Эйнштейна — его падчерица Марго

IXб. Трентон, 1 октября 1940 г. Судья Филипп Форман поздравляет Эйнштейна с получением американского гражданства. (Воспроизводится с разрешения г-жи Филипп Форман)

X. Чико, Элен Дюкас и Эйнштейн перед домом 112 по Мерсер-стрит (снимок сделан, видимо, в начале 40-х годов). (Воспроизводится с разрешения Э. Дюкас)

XI. Торт, преподнесенный Эйнштейну на семидесятилетие (1949 г.). Формулы взяты из дополнения II к третьему изданию работы «Сущность теории относительности» (Princeton University Press, 1950). (Воспроизводится с разрешения Э. Дюкас)

XII. Последняя из известных фотографий Эйнштейна, сделанная в марте 1955 г. перед домом 112 по Мерсер-стрит. (Архив Эйнштейна, воспроизводится с разрешения агенства ЮПИ)

так же возвышается над современниками, как когда-то Ньютон» [E5]. Профессор Карл Вильгельм Озеен из Упсальского университета предложил присудить премию Эйнштейну за объяснение фотоэффекта.

На этот раз Нобелевский комитет решил попросить одного из своих членов, Алвара Гульстранда, подготовить доклад о теории относительности, а другого — Аррениуса — о фотоэффекте.

Гульстранд, профессор офтальмологии Упсальского университета с 1894 г., был ученым крупного калибра. В 1890 г. он защитил диссертацию на степень доктора медицины и вскоре стал одним из крупнейших в мире специалистов по изучению глаза как оптического прибора. Вот что писали о нем в 1960 г.: «Офтальмологи считают, что после Гельмгольца не было другого ученого, который внес бы больший вклад в понимание функционирования человеческого глаза как оптической системы с использованием математических методов... В ходе своих исследований он обнаружил массу широко распространенных неверных представлений об оптическом формировании изображений и, будучи по натуре бойцом, посвятил многие из своих работ опровержению таких представлений» [H2]. В 1910 и 1911 гг. его кандидатура выдвигалась на присуждение Нобелевской премии по физике. «В 1911 г. сам Комитет предложил присудить премию профессору А. Гульстранду, Упсала „за его работы в области геометрической оптики". В том же году Гульстранд вошел в состав Комитета... Оказалось, однако, что Комитет по физиологии и медицине также решил дать ему премию „за работы по диоптрике глаза". Поэтому Гульстранд отказался от премии по физике, и Комитет подготовил дополнительный доклад (его подписал и Гульстранд), в котором премию предлагалось присудить В. Вину» [N1]. Гульстранд был членом Комитета по физике с 1911 по 1929 г. и его председателем с 1923 по 1929 г.

Доклад Гульстранда, в котором он резко критикует теорию относительности, нельзя признать удачным. Приведу цитаты из резюме доклада за 1921 г. О СТО там говорится так: «Эффекты, которые можно измерить с помощью физических средств, настолько малы, что в основном лежат в пределах погрешностей измерений». Он также дал промах и в оценке ОТО: «Как показал Гульстранд, ситуация такова, что пока неизвестно, можно ли вообще теорию Эйнштейна привести в согласие с экспериментом (!) Леверье по смещению перигелия». Гульстранд (как и многие другие) попался в ловушку — он будто бы показал, что объяснение смещения перигелия, даваемое ОТО, предполагает зависимость от координат. Он также высказал мнение (более разумное, но не очень веское) о том, что, прежде чем пытаться объяснить все прочие эффекты, следует пересмотреть с позиции ОТО другие давно известные отклонения от закона тяготения Ньютона. Двадцать пятого мая 1921 г. он представил статью,

в которой излагались эти соображения; экземпляр этой статьи был приложен к докладу [G1][3]).

Суть доклада Аррениуса сводилась к тому, что, во-первых, премия за квантовую теорию была совсем недавно (в 1918 г.) присуждена Планку и, во-вторых, если уж давать премию за фотоэффект, то предпочтительнее ее было бы присудить экспериментаторам.

Премия по физике за тот год присуждена не была.

1922 г. Список выдвигавших кандидатуру Эйнштейна вырос. Вновь в этом списке Эренгафт, Адамар, Лауэ, Э. и С. Мейеры, Наунин, Нордстрём и Варбург. Прекрасное письмо прислал Зоммерфельд. М. Бриллюэн писал: «Подумайте, что скажут о нас через пятьдесят лет, если Эйнштейна не будет в числе Нобелевских лауреатов» [B2]. Кандидатура Эйнштейна встречалась также в письмах Т. де Дондера (Брюссель), Р. Эмдена и Э. Вагнера (Мюнхен), П. Ланжевена (Париж) и Э. Поултона (Оксфорд).

Планк предложил присудить премии за 1921 и 1922 г. Эйнштейну и Бору соответственно.

Озеен вновь предложил дать премию за фотоэффект.

Комитет попросил Гульстранда подготовить дополнительный доклад по теории относительности, а Озеена — по фотоэффекту.

Гульстранд не сдавал позиций. Его статья предыдущего года [G1] подверглась критике со стороны приват-доцента из Кенигсберга Эриха Кречмана [K2], и Гульстранд опубликовал опровержение к его новому докладу [G2].

Озеен, по специальности физик-теоретик, дал превосходный анализ статьи Эйнштейна 1905 г. о световых квантах, а также его работы 1909 г. о флуктуациях энергии в излучении черного тела.

Комитет предложил присудить Эйнштейну премию за 1921 г. Академия поддержала это решение.

Так Эйнштейн получил Нобелевскую премию за «заслуги в области теоретической физики и, в особенности, за открытие закона фотоэлектрического эффекта». Поэтому-то Ауривиллиус и написал Эйнштейну 10 ноября 1922 г., что премия присуждена не за теорию относительности.

В речи во время церемонии награждения 10 декабря 1922 г. Аррениус сказал: «В основном, когда речь идет о работах Эйнштейна, упоминается теория относительности. Она относится к теории познания и потому вызывает оживленные дискуссии в философских кругах. Не секрет, что известный французский философ Бергсон оспаривает справедливость этой теории, в то время как другие философы единодушны в ее высокой оценке».

---

[3]) До того Гульстранд не опубликовал ни одной работы по ОТО. Мне кажется (но это всего лишь предположение), что он заинтересовался ОТО из-за одного из ее следствий, к которому он тоже, правда, в другом контексте, имел отношение; я имею в виду искривление лучей света.

В 1970 г. вышли в свет избранные труды Бергсона [В3]. Составители не включили в них книгу «Длительность и одновременность: по поводу теории Эйнштейна». Эйнштейн впоследствии познакомился с Бергсоном и относился к нему с уважением. О его философии Эйнштейн как-то сказал: «Бог ему простит».

Впоследствии Гульстранд и Кречман урегулировали свои разногласия к общему удовлетворению [К3].

Почему же Эйнштейн не получил Нобелевскую премию за теорию относительности? Как мне кажется, в основном из-за того, что на Академию очень уж давили, требуя присудить премию Эйнштейну. Но множество писем с его кандидатурой не было результатом какой-то организованной кампании; ведущие физики и так понимали, кем он был. Понятно и то, что Академия не спешила присуждать премию за теорию относительности до проверки экспериментом сначала специальной, а затем общей теории относительности. К несчастью, среди членов Академии не было никого, кто в те годы мог бы компетентно оценить содержание теории относительности. Предложение Озеена присудить премию Эйнштейну за фотоэффект, должно быть, было воспринято с облегчением Академией, оказавшейся меж двух огней.

Заслуживало ли объяснение фотоэффекта Нобелевской премии? Безусловно, да. Данная работа Эйнштейна была первым приложением квантовой теории к другим явлениям помимо излучения. Эта работа несет на себе печать гения. Последовательность присуждения премий по квантовой физике была безупречной: сначала Планк, затем Эйнштейн и, наконец, Бор. По иронии судьбы консервативно настроенный Комитет удостоил Эйнштейна Нобелевской премии за его самый революционный вклад в физику.

Глава 30. О ТЕХ, КОМУ ЭЙНШТЕЙН ПРЕДЛАГАЛ ПРИСУДИТЬ НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ

Предложения Эйнштейна о присуждении Нобелевских премий позволяют судить о том, что, по его мнению, было важным в то или иное время. Приводимые ниже сведения не относятся ни к исследованиям добродетелей, безрассудств или бед, сопутствующих присуждению премий, ни к колонке слухов типа светской хроники.

Девять из перечисленных ниже рекомендаций касаются ученых-физиков. (Как правило, рекомендации в виде писем направлялись в Нобелевский комитет в Стокгольме.) В других предлагается присудить премию мира; они адресованы норвежскому парламенту, стортингу. В одном случае речь идет о переписке по поводу присуждения Нобелевской премии по медицине Зиг-

мунду Фрейду, в другом — о присуждении премии по литературе Герману Броху.

1918 г., осень. В сентябре 1918 г. Эйнштейн получил из Стокгольма просьбу предложить кандидата для присуждения премии по физике за 1919 г. В своем ответе[1]) он предложил кандидатуру Планка за его достижения в исследовании теплового излучения, в частности за статьи «О законе распределения энергии в дифракционном спектре» и «Об элементарных квантах вещества и электричества». «В этих работах автор не только впервые точно определил абсолютный размер атомов, но и заложил основы квантовой теории, плодотворность которой для развития физики в целом стала очевидной в последние годы»[2]). Эйнштейн подчеркнул, что теория спектров Бора также основана на трудах Планка.

Тринадцатого ноября 1919 г. Планк получил премию по физике за 1918 г.

1921 г., 19 января. Эйнштейн поддержал предложение чешского парламента о присуждении премии мира Томашу Гарригу Масарику, первому президенту (с 1918 по 1935 г.) молодого чехословацкого государства. В своем письме Эйнштейн высоко отозвался о роли Масарика в защите угнетенных меньшинств, в особенности чехов и евреев, и добавил: «Я убежден, что присуждение ему Нобелевской премии явится прекрасной победой духа международного примирения...» (см. [N1, с. 41]).

1923 г., 26 октября. В ответ на следующее предложение выдвинуть кандидатуру на присуждение премии по физике Эйнштейн написал, что ему трудно назвать одно имя. «Чтобы избежать угрызений совести,— ответил он,— предлагаю примерно эквивалентные кандидатуры:

Дж. Франк и Г. Герц — за исследования возбуждения света при столкновениях электронов;

П. Ланжевен и П. Вейс — за статистическую теорию магнетизма;

О. Штерн и В. Герлах — за экспериментальное подтверждение ориентации атомов в магнитном поле, соответствующей квантовой теории;

А. Зоммерфельд — за вклад в создание квантовой механики;

А. Комптон — за открытие квантового рассеяния рентгеновского излучения;

Ч. Т. Р. Вильсон — за разработку метода „туманной камеры" как средства доказательства ионизации, вызываемой пучками частиц;

П. Дебай — за вклад в расширение наших знаний о молекулярных силах».

В 1925 г. премия по физике была присуждена Франку и Герцу.

---

[1]) Ответ не датирован, но, несомненно, написан осенью 1918 г.

[2]) Ссылки, приведенные в [P1, P2], прямо упоминаются в письме Эйнштейна.

1925 г., 22 мая. Эйнштейн предложил присудить премию мира известному бразильскому путешественнику и исследователю Кандиду Мариану да Силва Рондону. «Беру на себя смелость привлечь ваше внимание к деятельности генерала Рондона из Рио-де-Жанейро, так как во время поездки в Бразилию у меня сложилось впечатление, что он достоин Нобелевской премии мира. Он занимается адаптацией индейских племен к цивилизованной жизни без применения оружия или принуждения».

1927 г., 28 сентября. В краткой записке Эйнштейн вновь предложил кандидатуру Комптона «за открытие эффекта Комптона, названного в его честь, который является важной вехой на пути к познанию природы излучения».

В 1927 г. премия по физике присуждена Комптону и Вильсону. Официальный текст представления Комптона гласит: «За открытие эффекта, названного его именем».

1928 г., 15 февраля. Д-р Генрих Менг из Штутгарта, издатель «Zeitschrift für Psychoanalitische Pädagogik», и писатель Стефан Цвейг (живший тогда в Зальцбурге) обратились к ряду известных деятелей с просьбой поддержать предложение о присуждении Нобелевской премии Фрейду. Пятнадцатого февраля 1928 г. Эйнштейн направил Менгу следующий ответ: «При всем моем восхищении гениальными достижениями Фрейда я не могу участвовать в этом деле. В отношении степени истинности учения Фрейда я и сам не могу прийти к определенному мнению, не говоря уж о том, чтобы выносить суждение, которое может повлиять на других. Более того, мне представляется сомнительным, чтобы достижения такого психолога, как Фрейд, могли быть отмечены Нобелевской премией по медицине; речь, по-видимому, может идти только о премии в данной области».

Получив ответ Менга, Эйнштейн вновь высказал такие же соображения в письме от 26 октября 1928 г., отметив, что «исключительная трудность материала, несомненно, требует вынесения суждения квалифицированными специалистами».

Гораздо интереснее вопроса о присуждении Фрейду премии история взаимоотношений этих двух людей, каждый из которых по-своему повлиял на современников и на будущее. Их совместно написанная брошюра «Зачем воевать?» позволяет лишь в незначительной степени судить о личных отношениях Эйнштейна и Фрейда [E1]. Гораздо больше об этом говорится в отличной биографии Фрейда, принадлежащей перу Эрнеста Джонса [J1]. Упомяну здесь еще одно высказывание Эйнштейна о Фрейде, содержащееся в письме 1949 г.: «Старина Фрейд был очень проницателен; он не тешил себя иллюзиями, и единственное, что могло усыпить его бдительность,— это непоколебимая убежденность в правоте своих идей» [E2]. Я, естественно, оставляю за собой и за читателями право подвергнуть анализу это высказывание и самостоятельно судить о том, что оно говорит как о Фрейде, так и об Эйнштейне.

1928 г., 25 сентября. В этот день было написано первое из трех писем, в которых Эйнштейн обращал внимание на основы квантовой механики: «По моему мнению, наиболее крупным и пока не отмеченным по заслугам достижением физики является догадка о волновой природе механических процессов». Он сделал ряд предложений. Во-первых, половину премии дать де Бройлю, а другую половину разделить между «Дэвиссоном и его сотрудником» (К. Дж. Дэвиссоном и Л. Х. Джермером). Он считал, что «ситуация довольно трудна, так как решающая и стимулирующая роль принадлежала де Бройлю, но он не довел дело до конца, т. е. не подумал о возможности экспериментальной проверки» наличия волн материи. (Это не совсем верно, поскольку де Бройль упомянул о такой возможности в своей диссертации.) Далее Эйнштейн писал: «Нужно также рассмотреть кандидатуры теоретиков Гейзенберга и Шрёдингера (разделить премию между ними) и представить их к премии (может быть, за 1930 г.?). Что касается их достижений, то каждый из исследователей заслуживает полной Нобелевской премии, хотя их теории по сути своей совпадают. Однако, как мне кажется, в первую очередь следует рассмотреть кандидатуру де Бройля, в особенности потому, что его идеи *несомненно* верны, в то время как пока не ясно, что останется в будущем от грандиозных теорий двух других ученых».

В качестве других вариантов Эйнштейн предложил разделить премию между де Бройлем и Шрёдингером, а затем дать премию совместно Гейзенбергу, Борну и Иордану. Он, однако, отметил, что не считает такой вариант идеальным, так как заслуги Гейзенберга наиболее велики. По его мнению, было бы также не совсем верно присуждать премию за квантовую механику только теоретикам.

В начале 1928 г. Дирак предложил уравнение, названное его именем. Весьма примечательно, что ни в 1928 г., ни позднее Эйнштейн не предлагал кандидатуру Дирака.

В 1929 г. премия по физике была присуждена де Бройлю «за открытие волновой природы электрона». В 1937 г. Дэвиссон разделил премию с Дж. П. Томсоном, присужденную им за «экспериментальное обнаружение дифракции электронов на кристаллах».

1931 г., 20 сентября. К этому времени Эйнштейн убедился, что квантовой механике суждена долгая жизнь (§ 25.1). Он выдвинул кандидатуры «основателей волновой, или квантовой, механики профессора Э. Шрёдингера, Берлин, и профессора В. Гейзенберга, Лейпциг»:

> «По моему мнению, эта теория, безусловно, содержит часть окончательной истины. Результаты, полученные ими независимо друг от друга, настолько значительны, что было бы неуместно делить премию между двумя учеными.

Труднее сказать, кто из них должен получить премию первым. Я считаю, что достижения Шрёдингера более значительны, так как, по-моему, выдвинутые им концепции позволят продвинуться дальше, чем концепции Гейзенберга. (Здесь Эйнштейн сделал сноску: „Это, однако, лишь мое личное мнение, и я могу ошибаться".) С другой стороны, первая крупная публикация Гейзенберга вышла раньше работы Шрёдингера. Если бы решение зависело от меня, то я бы дал первым премию Шрёдингеру».

Суждение Эйнштейна о том, какая из работ важнее — Шрёдингера или Гейзенберга,— действительно оказалось ошибочным. Возможно, это еще более затруднило работу Нобелевского комитета. Премия по физике за 1931 г. присуждена не была.

1932 г., январь. Эйнштейн поддержал предложение о присуждении Нобелевской премии мира англичанину Герберту Рапхему Брауну [3]). (Примерно в то же время аналогичное предложение было сделано 25 членами британского парламента.) О почетном секретаре Интернационала противников войны Брауне Эйнштейн писал следующее: «По моему мнению, Рапхем Браун — наиболее выдающийся борец за дело пацифизма, неустанно и с большим мужеством служащий этому важному делу...».

1932 г., 29 сентября. «Вновь в этом году я предлагаю кандидатуру профессора Э. Шрёдингера, Берлин. Я считаю, что наше понимание квантовых явлений расширилось в основном благодаря его работам, связанным с работами де Бройля». Эйнштейн по-прежнему проводил различие между работами Шрёдингера и Гейзенберга.

Нобелевский комитет решил вообще не присуждать премии до 1933 г. В 1933 г. премию за 1932 г. получил Гейзенберг, а премию за 1933 г. присудили совместно Шрёдингеру и Дираку.

1935 г., 27 октября. Ранее Эйнштейн дважды поддерживал предложение о присуждении премии мира, сделанные другими. В этот раз он сам проявил инициативу. «С формальной точки зрения я не имею права предлагать кандидата для присуждения Нобелевской премии мира»,— писал Эйнштейн, но добавил, что совесть, тем не менее, заставляет его сделать это. Он выдвинул кандидатуру Карла фон Осецкого, «человека, который своими действиями и жертвами заслуживает премии более кого-либо из современников». Присуждение ему премии, писал далее Эйнштейн, «было бы историческим актом, в высшей степени соответствующим задачам установления мира» [4]).

---

[3]) Об обстоятельствах, в которых было сделано это предложение, говорится в [N1, с. 162].

[4]) В [N1, с. 266] рассказано о щекотливых проблемах, возникших в связи с этим предложением. Подробная биография Осецкого приведена в [G1].

Фон Осецкий был главным редактором пацифистского политического еженедельника «Die Weltbühne», выходившего в Берлине. Двенадцатого марта 1929 г. в нем появилось сообщение о том, что большая часть научно-исследовательских работ в области развития гражданской авиации Германии секретно выполнялась в военных целях. Автор статьи и фон Осецкий были обвинены в измене и осуждены на 18 месяцев тюремного заключения. В декабре 1932 г. Осецкий был амнистирован, а в феврале 1933 г., сразу же после прихода к власти нацистов, его отправили в концлагерь. Начиная с 1934 г., движение за присуждение ему Нобелевской премии мира переросло в международную кампанию. В январе 1936 г. более 500 парламентариев из Чехословакии, Великобритании, Франции, Нидерландов, Норвегии, Швеции и Швейцарии подписали петиции с просьбой о присуждении ему Нобелевской премии мира. Осецкий оставался в концлагере до мая 1936 г., когда его перевезли в тюремный госпиталь с острым туберкулезом. Осенью 1936 г. Геринг предложил ему свободу в обмен на обещание отказаться от премии мира, если она будет ему присуждена. Осецкий отверг это предложение. В ноябре 1936 г. ему была присуждена Нобелевская премия мира за 1935 г. Тридцатого января 1937 г. Гитлер постановил, что ни один немец не имеет больше права принимать Нобелевскую премию. Тем не менее, Нобелевский комитет присудил немецким ученым премию по химии в 1938 г. и по медицине в 1939 г. Осецкий по-прежнему содержался в тюремном госпитале, где и умер от туберкулеза в мае 1938 г.

1940 г., 17 января. Эйнштейн написал г-же де Хааз-Лоренц: «Вместе с некоторыми из коллег я предложил кандидатуры Отто Штерна и И. А. Раби к присуждению премии за создание новых методов измерения молекулярного магнитного момента».

В 1944 г. премия за 1943 г. была присуждена Штерну, премия за 1944 г.— Раби.

1945 г., январь. Эйнштейн направил следующую телеграмму: «Предлагаю присудить премию по физике Вольфгангу Паули. Его вклад в современную квантовую теорию состоит в предложении так называемого принципа Паули, или принципа запрета, ставшего фундаментальной частью современной квантовой физики и не зависящего от других основных аксиом данной теории. Альберт Эйнштейн».

В 1945 г. Паули получил премию по физике «за открытие принципа запрета, называемого также принципом Паули».

1951 г., 5 марта. Эйнштейн написал письмо почетному президенту в отставке «Новой школы социальных исследований» Нью-Йорка д-ру Элвину Джонсону. Оно, видимо, было ответом на направленное ему ранее Джонсоном письмо, в котором шла речь о возможности присуждения Нобелевской премии по литературе Герману Броху. Эйнштейн писал, что не знает и не понимает современную литературу. Однако, прочитав некоторые

отрывки из произведений Броха, он счел, что «видимо, будет вполне оправданно» предложить кандидатуру Броха.

Брох родился в 1886 г. в Вене. В 1938 г. эмигрировал в Соединенные Штаты. Вскоре после этого между ним и Эйнштейном установились дружеские отношения. Эйнштейн прочел его основное произведение «Смерть Вергилия», которое ему очень понравилось [B1]. Брох умер в 1951 г. в Нью-Хейвене.

1951 г. Эйнштейн предложил присудить Нобелевскую премию мира Фридриху Вильгельму Форстеру: «Трудно, видимо, найти людей, которые действительно добились успеха в деле укрепления мира». Тем не менее, продолжал он, Форстер принадлежит к группе лиц, которые постоянно и упорно добиваются этой цели; он, в частности, опубликовал ряд работ, посвященных показу опасности «прусско-германского милитаризма», сначала в Германии, затем в Швейцарии и, наконец, в США.

Крупный педагог, Форстер всю жизнь боролся против германского милитаризма, который он критиковал в многочисленных книгах, чем заслужил ненависть правящих кругов Германии как второго, так и третьего рейха. Сначала он был приговорен к трем месяцам тюремного заключения за клевету в адрес кайзера, а в 1926 г. был объявлен изменником, после того как опубликовал сообщение о секретных работах по милитаризации Германии. В 1940 г. он переехал в США, где позднее получил американское гражданство. Умер в 1966 г. в санатории под Цюрихом. Более подробно о Форстере можно прочитать в [F1, N2].

1954 г., 12 января. Эйнштейн поддержал предложение Лауэ о присуждении премии по физике Боте. В своем письме Эйнштейн в качестве основного достижения Боте привел опыт Боте — Гейгера.

В 1954 г. премия по физике была присуждена совместно Боте и Борну.

Недавно мне стало известно, что 19 декабря 1925 г. Эйнштейн направил в Стокгольм предложение о присуждении Нобелевской премии А. Комптону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ [1])

К гл. 1

B1. *Brunauer S.* // J. Wash. Acad. Sci.— 1979.— Vol. 69.— P. 108.
B2. *Berlin I.* Personal Impressions.— N. Y.: Viking, 1980.
E1. *Einstein A.* // Die Vossische Zeitung.— 1916.— May 23.
E2. *Idem*/Sozialistische Monatshefte.— 1919.— S. 1055.
E3. *Idem* // Neue Rundschau.— Vol. 33.— P. 815.
E4. *Idem* // Statement prepared for the Liga für Menschenrechte.— 1929.— January 6.
E5. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.— P. 684. (Т. 4.— С. 310—311.)[2])
E6. *Idem* // Bull. Soc. Fran. Philos.— 1923.— Vol. 22.— P. 97.
E7. *Idem* // I. Newton, Opticks.— N. Y.: McGraw-Hill, 1931.— P. VII. (Т. 4.— С. 140.)
E8. *Idem* // Naturwiss.— 1927.— Bd. 15.— S. 273. English transl.: Smithsonian Report for 1927.— P. 201.
E9. *Idem* // Emanuel Libman Anniversary Volumes.— N. Y.: International,— 1932.— Vol. 1.— P. 363. (Т. 4.— С. 82.)
E10. *Idem* // Nature.— 1927. Vol. 119.— P. 467; Science.— 1927.— Vol. 65.— P. 347. (Т. 4.— С. 94.)
E11. *Einstein Margot.* Letter to M. Schapiro, December 1978.
G1. *Gamow G.* My World Line.— N. Y.: Viking, 1970.
J1. *Jost R.* Letter to A. Pais, August 17, 1977.
K1. *Kastler A.* Technion-Informations, No. 11, December 1978.
N1. *Nathan O., Norden H.* Einstein on Peace.— N. Y.: Schocken, 1968.
O1. *Oppenheimer J. R.* // Einstein, a Centennial Volume/A. P. French, Ed.— Boston: Harvard Univ. Press, 1979.— P. 44.
P1. *Pais A.* // Niels Bohr/S. Rozental, Ed.— N. Y.: Intersci., 1967, P. 215.
R1. *Russell B.*/See [N1].— P. XV.
S1. *Salaman E.* // Encounter.— 1979.— April.— P. 19.
W1. *Williams L. P.* Michael Faraday.— N. Y.: Basic Books, 1965.

К гл. 2

B1. *Benz U.* Arnold Sommerfeld.— Stuttgart: Wissenschaftliche Verlags Gesellschaft, 1975.
B2. *Bergson H.* Durée et Simultanéité: A Propos de la Théorie d'Einstein.— Paris: Alcan, 1922.
E1. *Einstein A.* Ansprachen in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.— Karlsruhe: Müller, 1918.— S. 29. (Т. 4.— С. 155.)
E2. *Idem* // The London Times.— 1919.— November 28.
E3. *Idem.* Letter to C. Habicht, undated, most probably written in March 1905.

[1]) Обозначения EB, PAW, WA, Se, Oeuvres, введенные для краткости, поясняются в примечаниях ниже.

[2]) Здесь и далее в скобках даны ссылки на работы А. Эйнштейна, опубликованные на русском языке. Приведены том и страница по изданию «Альберт Эйнштейн: Собрание научных трудов».— М.: Наука, 1965—1967.— Т. 1.— 4.

E4. *Idem* // Forschungen und Fortschritte.— 1929.— Bd 5.— S. 248. (T. 4.— S. 110.)
E5. *Idem*. Letter to L. de Broglie, February 8, 1954.
E6. *Idem*. Letter to N. Bohr, April 4, 1949.
E7. *Idem*. On the Method of Theoretical Physics.— Oxford: Oxford Univ. Press. 1933; reprinted in: Philos. Sci.— 1934.— Vol. 1.— P. 162. (T. 4.— C. 181.)
E8. *Idem* // Lettres à Maurice Solovine.— Paris: Gauthier-Villars, 1956.— P. 130.
E9. *Idem*. Letters to I. Rosenthal-Schneider, October 13, 1945, and March 24, 1950; reprinted in [R1].— P. 36, 41.
K1. *Kinoshita T., Lindquist W. B.* // Phys. Rev. Lett.— 1981.— Vol. 47.— P. 1573.
N1. Nature.— 1921.— Vol. 107.— P. 504.
P1. *Pauli W.* // Neue Zuricher Zeitung.— 1958.— January 12; reprinted in *Pauli W.* Collected Scientific Papers/R. Kronig, V. Weisskopf, Ed.— N. Y.: Interscі., 1964.— Vol 2.— P. 1362.
R1. *Rosenthal-Schneider I.* Reality and Scientific Truth.— Wayne State Univ. Press., 1980.— P. 74.

К гл. 3

E1. Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 260, 261, 264.)
E2. *Einstein Pauline*. Letter to Jette Koch, August 1, 1886.
E3. *Einstein A*. Letter to H. Friedmann; March 18, 1929.
E4. *Idem*. Letter to Hermann Broch, September 2, 1945.
E5. *Idem*. Mes Projets d'Avenir; the original is in the Staatsarchive Kanton Aargau.
E6. *Idem*. Letter to Rosa Winteler, June 3, 1897.
E7. *Idem*. Letter to E. F. Magnin, February 25, 1931.
E8. *Idem*. Letter to H. Zangger, summer 1912.
E9. *Idem*. Letter to A. Hurwitz, September 23, 1900.
E10. *Idem*. Letter to A. Hurwitz, September 26, 1900.
E11. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 513. (T. 3.— C. 7.)
E12. *Idem*. Letter to M. Grossmann, April 14, 1901.
E13. *Idem*. Letter to W. Ostwald, March 19, 1901.
E14. *Idem* Letter to H. Kamerlingh-Onnes, April 17, 1901.
E15. *Einstein H*. Letter to W. Ostwald, April 13, 1901.
E16. *Einstein A*. Letter to J. Winteler, undated, 1901.
E17. *Idem*. Letter to M. Grossman, undated, 1901.
E18. *Idem*. Letter to the Eidgenössisches Amt für geistiges Eigentum, December 18, 1901; reproduced in [F2].— P. 55.
E19. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1902.— Bd 9.— S. 417.— (T. 3.— C. 34.)
E20. *Idem*. Letter to M. Solovine, November 25, 1948.
E21. *Einstein Pauline*. Letter to R. Winteler, February 20, 1902.
E22. *Einstein A*. Letter to C. Seelig, May 5, 1952.
E23. *Idem*. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen.— Bern: Buchdruckerei K. J. Wyss, 1905. (T. 3.—C 75.)
E26. *Idem* // Helle Zeit, Dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956.— S. 12. (T. 4.— C. 350.)
F1. *Föppl*. Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität.— Leipzig: Teubner, 1894.
F2. *Flückiger M*. Albert Einstein in Bern.— Bern: Paul Haupt Verlag, 1974.
H1. *Hausel Ph.* // Müncher Merkur.— 1979.— March 14.
H2. *Heis E., Eschweiller T. J.* Lechrbuch der Geometrie zum Gebrauch an hoheren Lehranstalten.— Cologne: Du-Mont and Schauberg, 1867.
K1. *Kollros L.* // Helv. Phys. Acta Suppl.— 1956.— Vol. 4.— P. 271.
K2. *Körber H.* // Forschungen und Fortschritte.— 1974.— Bd 38.— S. 74.
K3. *Klein M. J., Needell A.* // Isis.— 1977.— Vol. 68.— P. 601.
M1. Manuscript by Maja Einstein. Albert Einstein, Beitrag für sein Lebensbild, unpublished. Copy is present in the Princeton Archives.

R1. *Reiser A.* Albert Einstein, a Biographical Portrait.— N. Y.: A. and C. Boni, 1930.
S1. *Straus E. G.* Lecture given at Yeshiva Univ., September 18, 1979.
S2. *Seelig C.* Albert Einstein.— Zürich: Europa Verlag, 1950 [2]).
S3. *Sanesi E.* // Physis.— 1976.— Vol. 18.— P. 174.
S4. *Solovine M.*, Ed. Albert Einstein, Lettres à Maurice Solovine, introduction.— Paris: Gauthier. Villars, 1956.
T1. *Talmey M.* The Relativity Theory Simplified and the Formative Years of Its Inventor.— N. Y.: Falcon Press, 1932.
U1. *Uppenborn F.*, Ed. Die Versorgung von Städten mit elektrischem Strom.— Berlin: Springer, 1891.— S. 63.

К гл. 4

A1. *Arnold V. I., Avez A.* Problèmes Ergodiques de la Mécanique Classique.— Paris: Gauthier-Villars, 1967.
B1. *Born M.* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.
B2. *Boltzmann L.* // Wiener Ber.— 1866.— Bd 53.— S. 195; reprinted in Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann/F. Hasenöhrl, Ed.— N. Y.: Chelsea, 1968 [4]).
B3. *Idem* // Wiener Ber.— 1872.— Bd 66.— S. 275; WA.— Bd 1.— S. 316.
B4. *Idem* // Ibid.— 1871.— Bd 63.— S. 712; WA.— Bd 1.— S. 288.
B5. *Idem* // Ibid.— 1877.— Bd 75.— S. 62; WA.— Bd 2.— S. 112.
B6. *Idem* // Ibid.— 1877.— Bd 76.— S. 373; WA.— Bd 2.— S. 164.
B7. *Idem* // Sitzungsberichte, Preussische Akad. der Wissenschaften [5]).— S. 660; WA.— Bd 3.— S. 615.
B8. *Idem* // WA.— Bd 2.— S. 118, footnote 2.
B9. *Idem* // Wiener Ber.— 1868.— Bd 58.— S. 517; WA.— Bd 1.— S. 49 and Sec. III; Nature.— 1895.— Vol. 51.— P. 413; WA.— Bd 3.— S. 535.
B10. *Idem* // WA.— Bd 2.— S. 218.
B11. *Idem* // WA.— Bd 2.— S. 166, 223.
B12. *Idem* // Wiener Ber.— 1871.— Bd 63.— S. 679; WA.— Bd 1.— S. 259 (esp. S. 277); *Crelles J.*— 1887.— Vol. 100.— P. 201; WA.— Bd 3.— S. 258.
B13. *Idem.* Vorlesungen über die Principe der Mechanik.— Leipzig: Barth, 1897.— Bd 1.— S. 9; reprinted by Wissenschaftliche Buchges, Darmstadt, 1974.
B14. *Idem* // Wiener Ber.— 1875.— Bd 72.— S. 427; WA.— Bd 2.— S. 1, Eq. 13.
B15. *Idem.* Vorlesungen über Gastheorie.— Leipzig: Barth, 1896, 1898. English transl.: Lectures on Gas Theory. Berkeley: Univ. of California Press, 1964. Рус. пер.: *Больцман Л.* Лекции по теории газов: Пер. с нем.— М.: Гостехиздат, 1953.
C1. *Clausius R.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1850.— Bd 79.— S. 368, 500.
C2. *Idem* // Ibid.— 1865.— Bd 125.— S. 353 (esp. S. 400).
C3. *Idem* // Ibid.— 1871.— Bd 142.— P. 433.
D1. *Douglas V. A.* // J. Roy. Astron. Soc. Canad.— 1956.— Vol. 50.— P. 99.
E1. *Einstein A.* // [B1].— P. 46. (T. 4.— C. 275.)
E2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 34.— S. 175. (T. 3.— C. 252.)
E3. *Ehrenfest P., Ehrenfest T.* // Encyklopädie der Mathematische Wissenschaften.— Leipzig: Teubner, 1911.— Bd 4.— Pt 2.— Sec. 28. English transl.: The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics.— N. Y.: Cornell Univ. Press, Ithaca, 1959.
E4. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 549, footnote on p. 551. (T. 3.— C. 108, сноска на с. 110.)
E5. *Idem* // Ibid.— 1901.— Bd 4.— S. 513. (T. 3.— C. 7.)
E6. *Idem* // Ibid.— 1902.— Bd 8.— S. 798. (T. 3.— C. 18).
E7. *Idem.* Letter to M. Grossmann, April 14, 1901.

[2]) Везде далее эта работа обозначена Se. Рус. пер.: *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн: Пер. с нем.— 2-е изд.— М.: Атомиздат, 1966.
[4]) Ниже эта работа обозначена WA.
[5]) Ниже обозначена PAW.

E8. *Idem*. Letter to J. Stark, December 7, 1907; reprinted in: *Hermann A.* // Sudhoff's Archiv.— 1966.— Vol. 50.— P. 267.
E9. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 34.— S. 165. (T. 3.— C. 242.)
E10. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1902.— Bd 9.— S. 417. (T. 3.— C. 34.)
E11. *Idem* // Ibid.— 1903.— Bd 11.— S. 170. (T. 3.— C. 50.)
E12. *Idem* // Ibid.— 1904.— Bd 14.— S. 354. (T. 3.— C. 67.)
E13. *Idem* // Ibid.— 1905.— Bd 17.— S. 132. (T. 3.— C. 92.)
E14. *Idem*. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen — Bern: K. J. Wyss, 1905. Apart from a short addendum identical with Ann. Phys. (Leipzig).— 1906.— Bd 19.— S. 289. (T. 3.— C. 75.)
E15. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 34.— S. 591. (T. 3.— C. 91.)
E16. *Idem* // Kolloidzeitschr.— 1920.— Bd 27.— S. 137. (T. 3.— C. 91.)
E17. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 549. (T. 3.— C. 108.)
E18. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 19.— S. 371. (T. 3.— C. 118.)
E19. *Idem* // Z. Elektrochem.— 1907.— Bd 13.— S. 41. (T. 3.— C. 149.)
E20. *Idem* // Ibid.— 1908.— Bd 14.— S. 235. (T. 3.— C. 155.)
E21. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 22.— S. 180, 800. (T. 3.— C. 134.)
E22. *Idem* // Ibid.— 1907.— Bd 22.— S. 569. (T. 3.— C. 145.)
E23. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411, sec: 15, 16. (T. 1.— C. 65, § 15, 16.)
E24. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 185. (T. 3.— C. 164.)
E25. *Idem*/Ibid.— 1909.— Bd 10.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E26. *Einstein A., Hopf L.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1910.— Bd 33.— S. 1096. (T. 3.— C. 176.)
E27. *Iidem* // Ibid.— 1910.— Bd 22.— S. 1105. (T. 3.— C. 205.)
E28. *Einstein A.* // Ibid.— 1915.— Bd 47.— S. 879. (T. 3.— C. 325.)
E29. *Idem* // Ibid.— 1910.— Bd 33.— S. 1275. (T. 3.— C. 216.)
E30. *Idem* // Ibid.— 1911.— Bd 34.— S. 170, 590. (T. 3.— C. 247.)
E31. *Idem* // Ibid.— 1911.— Bd 35.— S. 679. (T. 3.— C. 253.)
E32. *Idem* // Ibid.— 1912.— Bd 37.— S. 832; Bd 38.— S. 881. (T. 3.— C. 266, 272.)
E33. *Idem* // J. Phys. (Paris).— 1913.— Vol. 3.— P. 277. (T. 3.— C. 323.)
E34. *Einstein A., Stern O.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1914.— Bd 40.— S. 551. (T. 3.— C. 314.)
E35. *Einstein A.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1916.— Bd 18.— S. 318. (T. 3.— C. 386.)
E36. *Idem* // Mitt. Phys. Ges. Zürich.— 1916.— Bd 16.— S. 47. (T. 3.— C. 393.)
E37. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1917.— Bd 18.— S. 121. (T. 3.— C. 393)
E38. *Idem* // Z. Phys.— 1924.— Bd 27.— S. 392. (T. 3.— C. 479.)
E39. *Idem* // PAW.— 1924.— S. 261. (T. 3.— C. 481.)
E40. *Idem* // Ibid.— 1925.— S. 3. (T. 3.— C. 489.)
E41. *Idem* // Ibid.— 1925.— S. 18. (T. 3.— C. 503.)
E42. *Idem* // Proc. of the 1st Solvay Conf./P. Langevin, M. de Broglie, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1911.— P. 407. (T. 3.— C. 277.)
E43. *Idem* // Kultur der Gegenwart/E. Lecher, Ed.— Leipzig: Teubner, 1915 (2nd ed., 1925). (T. 3.— C. 336.)
E44. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 184.
E45. *Idem*. Letter to M. Besso, March 17, 1903 // Einstein — Michele Besso Correspondance 1903—1955/P. Speziali, Ed.— Paris: Hermann, 1972 [6].) — P. 13.
E46. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1903.— Bd 11.— S. 184.
E47. *Idem*. Letter to M. Besso, January 1903 // EB.— P. 3.
E48. *Idem*. Letter to M. Grossmann, 1901, undated.
E49. *Idem*. Letter to M. Besso, June 23, 1918 // EB.— P. 126.
C1. *Gibbs J. W.* Elementary Principles of Statistical Mechanics.— New Haven, Conn.: Yale Univ. Press, 1902. Рус. пер.: *Гиббс Дж.* Основные

[6]) Ниже эта работа обозначена EB.

принципы статистической механики: Пер. с англ.— М.; Л.: Гостехиздат, 1946.
H1. *Hertz P.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1910.— Bd 33.— S. 537 (esp. s. 552).
J1. *Jahn S.* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1909.— Bd 6.— S. 229 (esp. s. 236).
K1. *Kuhn T. S.* // Critical Problems in the History of Science/M. Clagett, Ed.— Madison: Univ. of Wisconsin Press, 1962.— P. 321.
K2. *Klein M.* // Amer. Scientist.— 1970.— Vol. 58.— P. 84.
K3. *Idem* // The Boltzmann Equation/G. D. Cohen, W. Thirring, Eds.— N. Y.: Springer, 1973.— P. 53.
K4. *Idem* // Science.— 1967.— Vol. 157.— P. 609.
K5. *Idem* // Proc. of the Jerusalem Einstein Centennial Symp., March 1979.
K6. *Idem* Paul Ehrenfest.— Amsterdam: North Holland, 1970.— Vol. 1.— P. 176.
L1. *Landsberg P. T.* // Phys. Rev. Lett.— 1980.— Vol. 45.— P. 149.
L2. *Lorentz H. A.* See [E42].— P. 441.
L3. *Idem.* Entropie en Waarschynlykheid.— Leiden: Brill, 1923.— P. 39. English transl.: Lectures on Theoretical Physics.— Lond.: Macmillan, 1927.— Vol. 11.— P. 175.
L4. *Loschmidt J.* // Wiener Ber.— 1876.— Bd 73.— S. 128 (esp. S. 139); 1877.— Bd 75.— S. 67.
M1. *Maxwell J. C.* Letter to P. G. Tait, December 11, 1867 // *Knott C. G.* Life and Scientific Work of P. G. Tait.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1911.— P. 213.
M2. *Idem.* Letter to P. G. Tait, undated // Ibid.— P. 214.
M3. *Idem.* Letter to P. G. Tait, August 1873 // Ibid.— P. 114.
P1. *Planck M.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1900.— Bd 2.— S. 237.
P2. *Idem* // Ibid.— 1900.— Bd 2.— S. 202.
P3. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 553.
P4. *Pauli W.* Collected Scientific Papers/R. Kronig and V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Intersci., 1964.— Vol. 1.— P. 549.
P5. *Penrose R.* // General Relativity/S. W. Hawking and W. Israel, Eds.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979.— P. 581.
S1. *Sommerfeld A.* // Phys. Zeitschr.— 1917.— Bd 18.— S. 533.
S2. *Salaman E.* // Encounter.— April 1979.— P. 9.
S3. *Schottky W.* Thermodynamik.— Berlin: Springer, 1929. S. 116.
S4. *Sommerfeld A.* Thermodynamics and Statistical Mechanics.— N. Y.: Academic Press, 1956.— P. 213.
S5. *Schroedinger E.* // *Broda E.* Ludwig Boltzmann.— Vienna: Deuticke, 1955.— S. 65.
S6. Se.— S. 176.
U1. *Uhlenbeck G. E., Ford G. W.* Lectures in Statistical Mechanics.— Providence: Amer. Mathem. Society, 1963.— Chap. 1.

К ст. 5

A1. *Avogadro A.* // J. Phys. (Paris).— 1811.— Vol. 73.— P. 58; Alembic Reprints No. 4.— Edinburgh: Livingstone, 1961.
A2. *Avenarius R.* // Ann. Phys. Chem.— 1874.— Vol. 151.— P. 306.
B1. The Atomic Debates/W. H. Brock, Ed.— Leicester: Leicester Univ. Press, 1967.
B2. *Brock W. H., Knight M.* // Isis.— 1965.— Vol. 56.— P. 5.
B3. *Bernoulli D.* Hydrodynamica.— Strassbourg: Dulsecker, 1738.
B4. *Brush S. G.* The Kind of Motion We Call Heat.— Amsterdam: North Holland, 1976.
B5. *Brown R.* // Philos. Mag.— 1828.— Vol. 4.— P. 161; 1829.— Vol. 6.— P. 161.
B6. *Batchelor G. K., Green J. T.* // J. Fluid Mech.— 1972.— Vol. 56.— P. 401.
B7. *Batchelor G. K.* // Ibid.— 1977.— Vol. 83.— P. 97.
B8. *Idem* // Ibid.— 1976.— Vol. 74.— P. 1.
C1. *Cannizzaro S.* Alembic Reprints No 18.— Edinburgh: Livingstone, 1961.
C2. *Clausius R.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1857.— Bd 10.— S. 353.
C3. *Curie M.* // Rev. Sci.— 1900.— Vol. 14.— P. 65.
C4. *Cohen E.* // Naturwiss.— 1915.— Bd 3.— S. 118.

C5. *Cawkell T., Garfield E.* // Einstein, the First Hundred Years/M. Goldsmith, A. McKay, J. Woudhuysen, Eds.— Lond: Pergamon Press, 1980.— P. 31.
C6. *Cantoni G.* // Nuovo Cimento.— 1867.— Vol. 27.— P. 156.
C7. *Chu B., Lin J. S.* // J. Chem. Phys.— 1970.— Vol. 53.— P. 4454.
D1. *Dalton J.* New System of Chemical Philosophy.— Lond.: Bickerstaff, 1808.— Vol. 1.— Pt. 1; 1810.— Vol. 1.— Pt. 2; 1827.— Vol. 2. Рус. пер.: *Дальтон Дж.* // Сборник работ по атомистике. Пер. с англ.— Л.: ГХИ, 1940.
D2. *Deslattes R. D.* // Ann. Rev. Phys. Chem.— 1980.— Vol. 31.— P. 435.
D3. *Dewan R. K., Bloomfield V. A.* // J. Dairy Sci.— 1973.— Vol. 56.— P. 66.
D4. *Delsaulx J.* Quoted in *Svedberg T.* Die Existenz der Moleküle.— Leipzig: Akad. Verlag, 1912.— S. 91.
E1. *Ehrenfest P.* Collected Scientific Papers // M. J. Klein, Ed.— Amsterdam: North Holland, 1959.— P. 364.
E2. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 549. (T. 3.— C. 108.)
E3 *Idem.* Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen.— Bern: Wyss, 1905. (T. 3.— C. 75.)
E4. *Idem.* Letter to the Dekan der II. Sektion der Philos. Fakultät der Univ. Zürich, July 20, 1905.
E5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1906.— Bd 19.— S. 289. (T. 3.— C. 90.)
E6. *Idem* // Kultur der Gegenwart/E. Lecher, Ed.— Leipzig: Teubner, 1915 (2nd ed., 1925). (T. 3.— C. 336.)
E7. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 34.— S. 591. (T3.— C. 91.)
E8. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 19.— S. 371. (T. 3.— C. 118.)
E9. *Idem* // Ibid.— 1907.— Bd 22.— S. 569. (T. 3.— C. 145.)
E10. *Idem* // Ibid.— 1910.— Bd 33.— S. 1275 (T. 3.— C. 216.)
E11. *Idem* // Z. Elektrochem.— 1907.— Bd 13.— S. 41. (T. 3.— C. 149.)
E12. *Idem* // Ibid.— 1908.— Bd 14.— S. 235. (T. 3.— C. 155.)
E13. *Idem* // Letter to J. Perrin, January 12, 1911.
E14. *Idem* // Kolloidzeitschr.— 1920.— Bd 27.— S. 137. (T. 3.— C. 91.)
E15. *Idem.* Letter to J. Perrin, November 11, 1909.
E16. *Idem* // Naturwiss.— 1917.— Bd 5.— S. 737. (T. 4.— C. 36.)
E17. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1904.— Bd 14.— S. 354. (T. 3.— C. 67.)
E18. *Idem.* Letter to M. Smoluchowski, June 11, 1908.
E19. *Idem.* Letter to M. Smoluchowski, November 27, 1911.
F1. *Fürth R.*, Ed. Untersuchungen über die Theorie der Brownschen Bewegung.— Leipzig: Akad. Verlags Gesellschaft, 1922 English transl.: Investigations on the Brownian Movement.— Lond.: Methuen, 1926.
F2. *Idem* // Z. Phys.— 1922.— Bd 2.— S. 244.
G1. *Gay-Lussac J. L.* // Mém. Soc. d'Arcueil.— 1809.— Vol. 2.— P. 207; Alembic Reprint No. 4.— Edinburgh: Livingstone, 1961.
G2. *Gouy L. G.* // J. Phys. (Paris).— 1888.— Vol. 7.— P. 561.
H1. *van't Hoff J. H.* // Arch. Néerl. des Sci. Exactes et Nat.— 1886.— Vol. 20.— P. 239; Alembic Reprint No. 19.— Edinburgh: Livingstone, 1961.
J1. *Jahn S.* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1909.— Vol. 6.— P. 229.
K1. *Kogan H.* The Great Encyclopedia Britannica.— Chicago: Univ. of Chicago Press, 1958.
L1. *Loschmidt J.* // Wiener Ber.— 1866.— Bd 52.— S. 395.
L2. *Lanczos C.* The Einstein Decade.— N. Y.: Academic Press, 1974.— P. 140.
L3. *Langevin P.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1908.— Vol. 146.— P. 530.
M1. *de Milt Cf. C.* // Chymia.— 1948.— Vol. 1.— P. 153.
M2. *von Meyer E.* // J. Prakt. Chem.— 1911.— Vol. 83.— P. 182.
M3. *Менделеев Д. И.* Основы химии.— М.; Л.: ГХИ, 1947.
M4. *Maxwell J. C.* Collected Works.— N. Y.: Dover, 1952.— Vol. 2.
M5. *Mach E.* Popular Scientific Lectures.— Chicago: Open Court, 1910.— P. 207.
M6. *Maxwell J. C.* Theory of Heat.— Lond.: Longmans, Green and Co., 1872.— Chap. 22.

M7. *Müller E. W.* // Phys. Rev.— 1956.— Vol. 102.— P. 624; J. Appl. Phys.— 1956.— Vol. 27.— P. 474; 1957.— Vol. 28.— P. 1; Sci. Amer.— June 1957 — P. 113.
M8. *Münster A.* Handbuch der Physik/S. Flügge, Ed.— Berlin: Springer, 1962.— Bd 13.— S. 71.
M9. *Meyer S.* // Wiener Ber.— 1950.— Bd 159.— S. 1.
M10. *Mach E.* The Principles of Physical Optics, preface.— Lond.: Methuen, 1926.
N1. *Nye M. J.* Molecular Reality.— N. Y.: Elsevier, 1972.
N2. Nobel Lectures in Chemistry.— N. Y.: Elsevier, 1966.— P. 3.
O1. *Ostwald W.* // Verh. Ges. Deutsch. Naturforsch. Ärzte.— 1895.— Bd 1.— S. 155; French transl.: Rev. gén. sci.— 1895.— Vol. 6.— P. 956.
O2. *Ornstein L. S.* // Verslag. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1917.— Vol. 26.— P. 1005; Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1919.— Vol. 21.— P. 96.
O3. *Ostwald W.* Grundriss der Physikalischen Chemie, introduction.— Grossbothen, 1908.
P1. *Prout W.* // Ann. Philos.— 1815.— Vol. 6.— P. 321.
P2. *Idem* // Ibid.— 1816.— Vol. 7.— P. 111; Alembic Reprint No. 20.— Lond.: Gurney and Jackson, 1932.
P3. *Planck M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1883.— Bd 19.— S. 358.
P4. *Pfeffer W.* Osmotische Untersuchungen.— Leipzig: Engelmann, 1877.
P5. *Poincaré H.* // Rapports du Congrès International de Physique/C. Guillaume and L. Poincaré, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1900.— Vol. 1.— P. 27. Рус. пер. *Пуанкаре А.* О науке: Пер. с фр.— М.: Наука, 1983.
P6. *Perrin J.* // Ann. Chim. Phys.— 1909.— Vol. 18.— P. 1.
P7. *Idem.* Brownian Movement and Molecular Reality.— Lond.: Taylor and Francis, 1910.
P8. *Idem.* Les Atoms.— 4th ed.— Paris: Librairie Alcan, 1914. Рус. пер.: *Перрен Ж.* Атомы: Пер. с фр.— М.: Госиздат, 1924.
P9. *Idem.* Oeuvres Scientifiques.— Paris: CNRS, 1950.
R1. *Rayleigh* // Philos. Mag.— 1890.— Vol. 30.— P. 456.
R2. *Rücker A. W.* // J. Chem. Soc. (Lond.).— 1888.— Vol. 53.— P. 222.
R3. *Robinson H. R.* // Proc. Soc. (Lond.).— 1943.— Vol. 55.— P. 161.
R4. *Reiner M.* Deformation, Strain and Flow.— Lond.: Lewis, 1949.
R5. *Rutgers R.* // Rheol. Acta.— 1965.— Vol. 2.— P. 202, 305.
R6. *Roentgen W. C.* Letter to A. Einstein, September 18, 1906.
S1. *Sommerfeld A.* // Wiener Chem. Zeitung.— 1944.— Bd 47.— S. 25.
S2. Se.— S. 112.
S2a. *Sutherland W.* // Philos. Mag.— 1905.— Vol. 9 — P. 781.
S3. *von Smoluchowski M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1906.— Bd 21.— S. 756.
S4. *Szilard L.* // Z. Phys.— 1929 — Bd 53.— P. 840; reprinted in: The Collected Works of Leo Szilard/B. T. Feld, G. W. Szilard, Eds.— Cambridge: MIT Press, 1972 — P. 103.
S5. *von Smoluchowski M.* Boltzmann Festschrift.— Leipzig: Barth, 1904.— P. 627.
S6. *Idem.* Letter to J. Perrin, undated; quoted in [T4].— P. 161.
S7. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1908.— Bd 25.— S. 205.
S8. *Idem* // Philos. Mag.— 1912 — Vol. 23.— P. 165.
S9. *Idem* // Bull. Acad. Sci. Cracovie, Classe Sci. Math. Nat.— 1911.— P. 493.
S10. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 12, 1911.
S11. *Idem* // Bull. Acad. Sci. Cracovie Classe Sci. Math. Nat.— 1916.— P. 218.
S12. *Sommerfeld A.* // Phys. Zeitschr.— 1917.— Bd 18.— S. 534.
T1. *Thomson W.* // Nature.— 1870.— Vol. 1.— P. 551.
T2. *Truesdell C.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1976.— Vol. 15.— P. 1.
T3. *Thomson J. J.* // Philos. Mag.— 1899.— Vol. 48.— P. 565.
T4. *Teske A.* Marian Smoluchowski, Leben und Werk.— Warsaw: Polish Acad. Sci., 1977.
T5. *Tyndall J.* // Philos. Mag.— 1869 — Vol. 37.— P. 384; Vol. 38.— P. 156.
W1. *Williamson A. W.* // J. Chem. Soc. (Lond.).— 1869.— Vol. 22.— P. 328.
W2. *Williams L. P.* // Contemp. Phys.— 1960.— Vol. 2.— P. 93.

W3. *van der Waals J. D.* Over de Continuiteit van de Gas-en Vloeistoftoestand.— Leiden: Sythoff, 1873.
W4. *Wax N.*, Ed. Selected Papers on Noise and Stochastic Processes.— N. Y.: Dover, 1954.
Y1. *Young T* Miscellaneous Works.— Lond.: Murray, 1855; reprinted by Johnson Reprint.— N. Y., 1972.— Vol. 9.— P. 461.
Y2. *Yalamov Y. I., Vasiljeva L. Y., Schukin E. R.* // J. Coll. Interface Sci.— 1977.— Vol. 62.— P. 503.

К гл. 6

B1. *Bryan Cf. W. L.*, Ed. A Debate on the Theory of Relativity.— Chicago: Open Court, 1927.
B2. *Brace D. B.* // Philos. Mag.— 1904.— Vol. 7.— P. 317.
B3. *Bork A. M.* // Isis.— 1966.— Vol. 57.— P. 199.
B4. *Brush S. G.* // Ibid.— 1967.— Vol. 58.— P. 230.
C1. *Cohn E.* // Goett. Nachr.— 1901.— S. 74.
D1. *Dirac P. A. M.* // Nature.— 1951.— Vol. 168.— P. 906; Vol. 169.— P. 702.
D2. *Dukas H.* Memorandum to V. Hobson, secretary to Prof. J. R. Oppenheimer, June 21, 1966.
D3. *Drude P.* The Theory of Optics.— N. Y.: Dover, 1959.— P. 457.
E1. *Einstein A.* The Meaning of Relativity.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1921. (T. 2.— C. 5.)
E2. *Idem.* Letter to M. Besso, December 23, 1925 // EB.— P. 215.
E2a. *Idem* // Forschungen und Fortschritte.— 1927.— Bd 3.— S. 36. (T. 2.— C. 188.)
E3. *Idem.* Letter to O. Veblen, April 30, 1930.
E4. *Idem.* Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie.— Stockholm: Imprimerie Royale, 1923. English transl.: [N1].— P. 482. (T. 2.— C. 120.)
E5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 891. (T. 1.— C. 7.)
E6. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T4 — C. 259.)
E7. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411. (T. 1.— C. 65.)
E8. *Idem* // Kultur der Gegenwart/E. Lecher, Ed.— Leipzig: Teubner, 1915.— Bd 3.— Sec. 3. (T. 3.— C. 336.)
E9. *Idem.* The Meaning of Relativity.— 5th ed.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1955. (T. 2.— C. 5.)
E10. *Idem* // Science.— 1931.— Vol. 73.— P. 375. (T. 4.— C. 147.)
E11. *Idem* // Z. Angew. Chemie.— 1931.— Bd 44.— S. 685. (T. 4.— C. 150.)
E12. *Idem* // Helle Zeit, Dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956. (T. 4.— C. 350.)
E13. *Idem.* Letter to M. Grossmann, undated, 1901.
E14. *Idem.* Letter to M. Besso, March 6, 1952 // EB.— P. 464.
E15. *Idem.* Lettres à Maurice Solovine.— Paris: Gauthier-Villars, 1956.— P. VIII.
F1. *Fresnel A.* Letter to F. Arago, September 1818 // Oeuvres d'Augustin Fresnel.— Paris: Imprimerie Royale, 1868.— Vol. 2.— P. 627.
F2. *Fizeau A.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1851.— Vol. 33.— P. 349.
F3. *FitzGerald G. F.* // Science.— 1889.— Vol. 13.— P. 390.
F4. *Idem.* Letter to O. Heaviside // *Bork A. M.* Dictionary of Scientific Biography.— N. Y.: Scribner's, 1972.— Vol. 5.— P. 15.
F5. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, November 10, 1894; reprinted in [B4].
F6. *Flückiger M.* Albert Einstein in Bern.— Bern: Paul Haupt Verlag, 1974.— P. 71—76.
H1. *Howard J. N.* // Isis.— 1967.— Vol. 58.— P. 88.
H2. *Holton G.* // Ibid.— 1969.— Vol. 60.— P. 133.
H3. *Hertz H.* // Gesammelte Werke.— 2nd ed.— Leipzig: Barth, 1894.— Vol. 2.— P. 23.
H4. *Idem.* Electric Waves.— N. Y.: Dover, 1962.— P. 21.
H5. *Hirosige T.* // Hist. St. Phys. Sci.— 1976.— Vol. 7.— P. 3.
I1. *Ishiwara J.* Einstein Kōen-Roku.— Tokyo: Tokyo-Tosho, 1977.
K1. *Kelvin.* Baltimore Lectures, Appendix B.— Lond., Clay, 1904.

L1. *Lorentz H. A.* Lectures on Theoretical Physics.— Lond.: McMillan, 1927.— Vol. 1.— P. 3.
L2. *Livingston D. M.* The Master of Light.— N. Y.: Scribner's, 1973.— Chap. 3.
L3. *Lorentz H. A.* // Arch. Néerl.— 1886.— Bd 21.— S. 103; reprinted in: *Lorentz H. A.* Collected Papers.— The Hague: Nyhoff, 1936.— Vol. 4.— P. 153.
L4. *Idem.* Versuch Einer Theorie der Electrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern. Collected Papers.— Leiden: Brill, 1895.— Bd 5.— S. 1.
L5. *Idem.* Letter to Lord Rayleigh, August 18, 1892; reprinted in [S2].
L6. *Livingston D. E.* // Science.— 1926.— Vol. 63.— P. 105.
L7. *Lorentz H. A.* The Theory of Electrons.— 1st ed. Leipzig: Teubner, 1909.— Sec. 169. Рус. пер.: *Лоренц Г. А.* Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения: Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1953.
L8. *Larmor J.*, Ed. The Scientific Writings of the Late George Francis FitzGerald.— Lond.: Longmans Green, 1902.
L9. *Idem.* Aether and Matter.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1900.
L10. *Lorentz H. A.* // Arch. Néerl.— 1892.— Vol. 25.— P. 363; Collected Papers.— Vol. 2.— P. 164.
L11. *Idem* // Verslag. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1892.— Vol. 1.— P. 74.
L12. *Idem.* Letter to G. F. FitzGerald, November 10, 1894; reprinted in [B4].
L13. *Idem* // Verh. Ges. Deutsch. Naturforsch. Ärzte.— 1898.— Bd 70.— S. 56; Collected Papers.— Vol. 7.— P. 101.
L14. *Idem* // Verslag. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1902.— Vol. 10.— P. 793; Collected Papers.— Vol. 5.— P. 139.
L15. *Idem* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1904.— Vol. 6.— P. 809; Collected Papers.— Vol. 5.— P. 172.
M1. *Maxwell J. C.* Encyclopedia Britannica.— 9th ed.— 1878.— Vol. 8; reprinted in: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.— N. Y.: Dover, 1952.— Vol. 2.— P. 763.
M2. *Idem* // Nature.— 1880.— Vol. 21.— P. 315.
M3. *Michelson A. A.* // Amer. J. Sci.— 1881.— Vol. 22.— P. 120.
M4. *Idem.* Letter to Lord Rayleigh, March 6, 1887; reprinted in [S2].
M5. *Idem.* Letter to Lord Rayleigh, August 17, 1887; reprinted in [S2].
M6. *Michelson A. A., Morley E. W.* // Amer. J. Sci.— 1887.— Vol. 34.— P. 333.
M7. *Michelson A. A., Pease F. G., Pearson F.* // Nature.— 1929.— Vol. 123.— P. 88; J. Opt. Soc.— 1929.— Vol. 18.— P. 181.
M8. *Morley E. W., Miller D. C.* // Philos. Mag.— 1905.— Vol. 9.— P. 680.
M9. *Miller D. C.* // Rev. Mod. Phys.— 1933.— Vol. 5.— P. 203.
M10. *Idem* // Proc. Nat. Acad. Sci.— 1925.— Vol. 11.— P. 306; Science.— 1925.— Vol. 61.— P. 617.
M11. *Idem* // Science.— 1926.— Vol. 63.— P. 433.
M12. *Michelson A. A.* Studies in Optics.— Chicago: Univ. of Chicago Press, 1927.— Chap. 14.
M13. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 5, 1923.
M14. *McCormmach R.* // Dictionary of Scientific Biography.— N. Y.: Scribner's, 1972.— Vol. 6.— P. 340.
M15. *Miller A. I.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1973.— Vol. 10.— P. 207.
M16. *Minkowski H.* // Phys. Zeitschr.— 1908.— Bd 9.— S. 762.
M17. *Michelson A. A., Morly E. W.* // Amer. J. Sci.— 1886.— Vol. 31.— P. 377.
M18. *Mehra J.* // Phys. Blatt.— 1971.— Bd 27.— S. 385; Report CPT-82/Univ. of Texas at Austin.— 1971.
N1. Nobel Lectures in Physics 1901—1921.— N. Y.: Elsevier, 1967.— P. 159ff.
O1. *Ogawa T.* // Jap. St. Hist. Sci.— 1979.— Vol. 18.— P. 73.
P1. *Panofsky W. K. H., Phillips M.* Classical Electricity and Magnetism.— Reading, Mass.: Addison-Wesly, 1955.
P2. *Poincaré H.* // Rev. Metaphys. Morale.— 1898.— Vol. 6.— P. 1. Рус. пер.: *Пуанкаре А.* О науке: Пер. с фр.— М.: Наука, 1983.
P3. *Idem.* Report of the International Physics Congress/C. Guillaume, L. Poincaré, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1900.— Vol. 1.— P. 1. Рус. пер. см. [P2].

P4. *Idem.* Science and Hypothesis.— N. Y.: Dover, 1952. Рус. пер. см. [P2].
P5. *Idem* // Bull. Sci. Math.— 1904.— Vol. 28.— P. 302.
P6. *Idem.* The Value of Science // The Foundational of Science.— N. Y.: Sci. Press, 1913. Рус. пер. см. [P2].
P7. *Idem.* Theorie Mathématique de la Lumière.— Paris: Carré, 1889.
P8. *Idem.* Electricité et Optique.— Paris: Carré and Naud, 1901.
P9. *Idem* // Oeuvres de Henri Poincaré.— Paris: Gauthier-Villars, 1954 [7]).— Vol. 9.— P. 369—426.
P10. *Idem* // Ibid.— Vol. 9.— P. 427—488.
P11. *Idem* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1905.— Vol. 140.— P. 1504; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 489.
P12. *Idem* // Rend. Circ. Mat. (Palermo).— 1906.— Vol. 21.— P. 129; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 494. Рус. пер.: *Пуанкаре А.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 85.
P13. *Idem* // Oeuvres.— Vol. 9.— P. 500.
R1. *Rayleigh* // Philos. Mag.— 1902.— Vol. 4.— P. 678.
R2. *Reiser A.* // Albert Einstein.— N. Y.: Boni, 1930.— P. 52.
S1. *Swenson L. S.* The Ethereal Aether.— Austin: Univ. of Texas Press, 1972.— P. 194.
S2. *Shankland R. S.* // Isis.— 1967.— Vol. 58.— P. 86.
S3. *Idem* // Amer. J. Phys.— 1964.— Vol. 32.— P. 16.
S4. *Shankland R. S., McCuskey S. W., Leone F. C., Kuerti G.* // Rev. Mod. Phys.— 1955.— Vol. 27.— P. 167.
S5. *Shankland R. S.* Biography Quarterly.— Honolulu: Univ. of Hawaii Press, 1979.— Vol. 2, No. 3.
S6. *Idem* // Amer. J. Phys.— 1962.— Vol. 31.— P. 47; 1973.— Vol. 41.— P. 895.
S7. *Idem* // Ibid.— 1964.— Vol. 32.— P. 16.
T1. *Trouton F. T., Noble H. R.* // Philos. Trans. Roy. Soc.— 1903.— Vol. A202.— P. 165.
V1. *Veblen O.* Letter to A. Einstein, April 17, 1930.
V2. *Voigt W.* // Goett. Nachr.— 1887.— S. 41.
V3. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1888.— Bd 35.— S. 370, footnote on p. 390.
V4. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1908.— Bd 9.— S. 762.

К вл. 7

A1. *Abraham M.* // Phys. Zeitschr.— 1902.— Bd 4.— S. 57.
A2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1903.— Bd 10.— S. 105.
B1. *Born M.* Die Relativitätstheorie Einsteins.— Berlin: Springer, 1921. English transl.: Einstein's Theory of Relativity.— Lond.: Methuen, 1924.
B2. *Bilaniuk O. M., Deshpande V. K., Sudarshan E. C. G.* // Amer. J. Phys.— 1962.— Vol. 30.— P. 718.
B3. *Brasch F. E.* // Library of Congress Quarterly.— 1945.— Vol. 2(2).— P. 39.
B4. *Braunbeck W.* // Z. Phys.— 1937.— Bd 107.— S. 1.
B5. *Bucherer A. H.* Mathematische Einführung in die Electronentheorie.— Leipzig: Teubner, 1904.— P. 57—58.
B6. *Idem.* Letters to A. Einstein, September 7, 9, 10, 1908.
B7. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1908.— Bd 9.— S. 755.
E1. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 891. (T. 1.— C. 7.)
E2. *Idem.* Letter to C. Habicht, undated, spring 1905.
E3. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411. (T1.— C. 65.)
E4. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1911.— Bd 12.— S. 509. (T. 1.— C. 187.)
E5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 23.— S. 197. (T. 1.— C. 49.)
E5a. *Idem* // Astron. Nachr.— 1914.— Bd 199.— S. 7, 47. (T. 1.— C. 313.)
E6. *Idem* // PAW.— 1916.— S. 423; Naturwiss.— 1918.— Bd 16.— S. 697. (T. 1.— C. 616.)
E7. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 132. (T. 3.— C. 92.)
E8. *Einstein A., Bargmann V.* // Ann. Math.— 1944.— Vol. 45.— P. 1. (T. 2.— C. 568.)

---

[7]) Далее обозначено Oeuvres.

E9. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 639. (T. 1.— C. 36.)
E10. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 20.— S. 627, footnote on p. 633. (T. 1.— C. 39, 44.)
E11. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 442. (T. 1.— C. 65.)
E12. *Idem* // Bull. Amer. Math. Soc.— 1935.— Vol. 41.— P. 223. (T. 2.— C. 416.)
E13. *Idem* // Technion J.— 1946.— Vol. 5.— P. 16. (T. 2.— C. 650.)
E14. *Idem.* Letter to C. Habicht, undated, fall 1905.
E15. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 443.
E16. *Idem* // Arch. sci. phys. Natur.— 1910.— Vol. 29.— P. 5, 125 (esp. p. 144). (T. 1.— C. 138.)
E17. *Ehrenfest P.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 23.— S. 204.
E18. *Einstein A., Laub J. J.* // Ibid.— 1908.— Bd 26.— S. 532; Corrections.— Ibid.— 1908.— Bd 27.— S. 232; 1909.— Bd 28.— S. 445. (T. 1.— C. 115, 123.)
E19. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1908.— Bd 26.— S. 541. (T. 1.— C. 126.)
E20. *Einstein A.* Die Grundlage der Allgemeinan Relativitätstheorie, introduction.— Leipzig: Barth, 1916. (T. 1.— C. 452.)
E21. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1906.— Bd 21.— S. 583. (T. 1.— C. 45.)
E22. *Idem* // Ibid.— 1907.— Bd 23.— S. 206. (T. 1.— C. 51.)
E23. *Idem* // Ibid.— S. 371. (T. 1.— C. 53.)
E24. *Idem* // Science.— 1934.— Vol. 80.— P. 358.
E25. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1909.— Bd 28.— S. 885. (T. 1.— C. 135.)
E26. *Idem* // Arch. sci. phys. Natur.— 1910.— Vol. 30.— P. 323. (T. 3.— C. 240.)
E27. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E28. *Idem* // Arch. sci. phys. Natur.— 1910.— Vol. 29.— P. 5, 125. (T. 1.— C. 138.)
E29. *Idem* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1911.— Bd 56.— S. 1. (T. 1.— C. 175.)
E30. *Idem* // Scientia.— 1914.— Vol. 15.— P. 337. (T. 1.— C. 385.)
E31. *Idem* // Kultur der Gegenwart/E. Lecher, Ed.— Leipzig: Teubner, 1915.— Bd 1.— S. 251 (2nd ed., 1925). (T. 3.— C. 336.)
E32. *Idem* // Ibid.— 2nd ed.— Bd 1.— S. 783.
E33. *Idem.* The Meaning of Relativity.— 5th ed.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1956. (T. 2.— C. 5.)
E34. *Idem* // Die Vossische Zeitung.— April 26.— 1914.
E35. *Idem* // Naturwiss.— 1914.— Bd 2.— S. 1018. (T. 4.— C. 17.)
E36. *Idem* // Ibid.— 1922.— Bd 10.— S. 184. (T. 4.— C. 46.)
E37. *Ehrenfest P.* // Phys. Zeitschr.— 1906.— Bd 7.— S. 302.
F1. *Frank P.* // Sitz. Ber. Akad. Wiss. Wien.— 1909.— IIa, Bd 118.— S. 373 (esp. p. 382).
F2. *Feinberg G.* // Phys. Rev.— 1967.— Vol. 159.— P. 1089; 1978.— Vol. D17.— P. 1651.
G1. *Goldberg S.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1970.— Vol. 7.— P. 7.
H1. *Hasenöhrl F.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1904.— Bd 15.— S. 344; 1905.— Bd 16.— S. 589.
H2. *Hilbert D.* // Gesammelte Abhandlungen von Herman Minkowski.— Leipzig: Teubner, 1911.— Bd 1.— S. XXXI.
H3. *Heaviside O.* // Philos. Mag.— 1889.— Vol. 27.— P. 324.
K1. *Kramers H. A.* Quantum Mechanics.— N. Y.: Intersci., 1957.— Sec. 57.
K2. *Kaufmann W.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1897.— Bd 61.— S. 545.
K3. *Idem* // Goett. Nachr.— 1901.— S. 143.
K4. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1902.— Bd 4.— S. 54.
K5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1906.— Bd 19.— S. 487.
L1. *von Laue M.* // Ibid.— 1907.— Bd 23.— S. 989.
L2. *Lorentz H. A.* Versuch einer Theorie der Electrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern.— Leiden: Brill, 1895; Collected Papers.— The Hague: Nyhoff, 1937.— Vol. 5.— P. 1.
L3. *Langevin P.* // J. Phys. (Paris).— 1913.— Vol. 3.— P. 553.
L4. *von Laue M.* Das Relativitätsprinzip.— Braunschweig: Vieweg, 1911.
L5. *Lewis G. N., Tolman R.* // Philos. Mag.— 1909.— Vol. 18.— P. 510.
L6. *Laub J. J.* Letter to A. Einstein, February 2, 1908.

L7. *Landsberg P. T.* // Phys. Rev. Lett.— 1980.— Vol. 45.— P. 149.
L8. *Lorentz H. A.* The Theory of Electrons.— 1st ed.— Leipzig: Teubner, 1909. Рус. пер.: *Лоренц Г. А.* Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения: Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1953.
L9. *Idem* // Proc. Roy. acad. (Amsterdam).— 1904.— Vol. 6.— P. 809; Collected Papers.— Vol. 5.— P. 172.
L10. *von Laue M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 35.— S. 124.
L11. *Langevin P.* // Rev. gén. sci.— 1905.— Vol. 16.— P. 257.
M1. *Møller C.* The Theory of Relativity.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1952.— Chap. 2.
M2. Manuscript by Maja Einstein. Albert Einstein. Beitrag für sein Lebensbild, unpublished. Florence, 1924. Copy is present in the Princeton Archives.
M3. *von Mosengeil K.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 22.— S. 867; reprinted in [P5].— Bd 2.— S. 138.
M4. *Minkowski H.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1915.— Bd 47.— S. 927.
M5. *Idem* // Goett. Nachr.— 1908.— P. 53; reprinted in: Gesammelte Abhandlungen von Herman Minkowski.— Leipzig: Teubner, 1911.— Bd 2.— S. 352.
M6. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 104; [M5].— Bd 2.— S. 431.
M7. *Miller A. I.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1973.— Vol. 10.— P. 207.
M8. *Minkowski H.* // Phys. Zeitschr.— 1908.— Bd 9.— S. 762.
O1. *Ogawa T.* // Jap. St. Hist. Sci.— 1979.— Vol. 18.— P. 73.
O2. *Ott H.* // Z. Phys.— 1963.— Bd 175.— S. 70.
P1. *Pauli W.* // Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften.— Leipzig: Teubner, 1921.— Bd 5.— Pt. 2.— S. 539. English transl.: Theory of Relativity.— Lond.: Pergamon Press, 1958. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.
P2. *Panofsky W. K. H., Phillips M.* Classical Electricity and Magnetism.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1955.— Chap. 15.
P3. *Pauli W.* Wissenschaftlicher Briefewechsel.— N. Y.: Springer, 1979.— Bd 1.— S. 296—312.
P4. *Planck M.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1906.— Bd 4.— S. 136; PAW.— 1907.— S. 542; Ann. Phys. (Leipzig).— 1908.— Bd 26.— S. 1.
P5. *Planck M.* Wissenschaftliche Selbstbiographie.— Leipzig: Barth, 1948; reprinted in *Planck M.* Physikalische Abhandlungen und Vorträge.— Braunschweig: Vieweg, 1958.— Bd 3.— S. 374.
P6. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1906.— Bd 7.— S. 753; [P5].— Bd 2.— S. 121.
P7. *Idem.* Letter to A. Einstein, July 6, 1907.
P8. *Panofsky W. K. H.* // Proc. Einstein Centennial Symp. at Princeton, 1979.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.— P. 94.
P9. *Purcell E. M.* // Ibid.— P. 106.
P10. *Pais A.* Aspects of Quantum Theory/A. Salam, E. P. Wigner, Eds.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1972.— P. 79.
P11. *Poincaré H.* // Compt. rend. Acad. sci (Paris).— 1905.— Vol. 140.— P. 1504; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 489.
P12. *Idem* // Rend. Circ. Mat. (Palermo).— 1906.— Vol. 21.— P. 129; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 494 (esp. sec. 8). Рус. пер.: *Пуанкаре А.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 85.
P13. *Planck M.* // Phys. Zeitschr.— 1906.— Bd 7.— S. 753; [P5].— Bd 2.— S. 121.
P14. *Poincaré H.* // Rev. gén. sci.— 1908.— Vol. 19.— P. 386; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 551.
R1. *Robertson H. P.* // Rev. Mod. Phys.— 1949.— Vol. 21.— P. 378.
R2. *Rutherford E., Chadwick J., Ellis C. D.* Radiations from Radioactive Substances.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1930.— P. 531.
S1. *Sommerfeld A.*, Ed. The Principle of Relativity.— N. Y.: Dover.— P. 37.
S2. Se.
S3. *Stokes G. G.* Mathematical and Physical Papers.— N. Y.: Johnson, 1966.— Vol. 1.— P. 17.
S4. *Searle G.* // Philos. Trans. Roy. Soc.— 1896.— Vol. 187.— P. 675.
S5. *Schuster A.* // Philos. Mag.— 1897.— Vol. 43.— P. 1.

T1. *Thomas L. H.* // Nature.— 1926.— Vol. 117.— P. 514; Philos. Mag.— 1927.— Vol. 3.— P. 1.
T2. *Thomson J. J.* // Philos. Mag.— 1881.— Vol. 11.— P. 229
T3. *Idem* // The Royal Institute Library of Science, Physical Sciences.— N. Y.: Elsevier, 1970.— Vol. 5.— P. 36.
U1. *Uhlenbeck G. E., Goudsmit S.* // Naturwiss.— 1925.— Bd 13.— S. 953.
U2. *Uhlenbeck G. E.* // Phys. Today.— 1976.— Vol. 29(6).— P. 43.

К гл. 8

B1. *Bergson H.* // Bull. Soc. Fran. Philos.— 1922.— Vol. 22.— P. 102.
B2. *Born M.* The Born — Einstein Letters.— N. Y.: Walker and Co., 1971.
B3. *Idem.* Letter to A. Einstein, September 26, 1953 // [B2].— P. 197.
B4. *Bloom H.* The Anxiety of Influence.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1973.
B5. *Born M.* // Helv. Phys. Acta Suppl.— 1956.— Vol. 4.— P. 244.
E1. *Einstein A.* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411. (T. 1.— C. 65.)
E2. *Idem.* Letter to J. Stark, September 25, 1907 // [H1].
E3. *Idem.* Letter to M. Besso, March 17, 1903 // EB.— P. 13.
E4. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1908.— Bd 5.— S. 18. (T1.— C. 114.)
E5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 23.— S. 371. (T1.— C. 53.)
E6. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 20.— S. 627. (T. 1.— C. 39.)
E7. *Idem* // PAW — 1921 — S. 123. An extended version was published by Springer.— Berlin, 1921. (T. 2.— C. 83.)
E8. *Idem.* Letter to J. Laub, May 19, 1909.
E9. *Idem.* Letter to M. Grossmann, December 10, 1911.
E10. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, November 23, 1911.
E11. *Idem* // Math. Naturwiss. Blatt.— 1928.— Bd 22.— P. 24.
E12. *Idem.* Letter to H. Zangger, November 15, 1911.
E13. *Idem.* Letter to M. G. Mittag-Leffler, April 12, 1920.
E14. *Idem.* Letter to M. G. Mittag-Leffler, July 21, 1920.
E15. *Idem* // New York Times.— 1920.— December 3.
E16. *Idem.* Letter to A. Sommerfeld, January 28, 1922 // Albert Einstein — Arnold Sommerfeld Briefwechsel/A. Hermann, Ed.— Stuttgart: Schwabe Verlag, 1968.— P. 99.
E17. *Idem.* Letter to A. Mercier, November 9, 1953.
E18. *Idem.* Letter to C. Seelig, February 19, 1955 // Se.— S. 114.
E19. *Idem.* Letter to F. C. Davenport, February 9, 1954.
E20. *Idem.* On the Method of Theoretical Physics.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1933. (T. 4.— C. 181.)
H1. *Hermann A.* // Sudhoff's Archiv.— 1966.— Bd 50.— S. 267.
K1. *Klein F.* Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19 Jahrhundert.— N. Y.: Springer, 1979.— Bd 1.— S. 374—380.
L1. *Lorentz H. A.* Theory of Electrons.— 1st ed.— Leipzig: Teubner, 1909. Рус. пер.: *Лоренц Г. А.* Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения: Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1953.
L2. *Idem.* Das Relativitatsprinzip.— Leipzig: Teubner, 1920.— S. 23.
L3. *Idem* // [L1] — 2nd ed — 1915.— P. 321.
L4. *Idem.* Draft of letter to A. Einstein, undated, January 1915.
L5. *Leon X.* // Bull. Soc. Fran. Philos.— 1922.— Vol. 22.— P. 93.
L6. *Lorentz H. A.* // Proc. Roy. Soc. (Amsterdam).— 1904.— Vol. 6.— P. 809; reprinted in: *Lorentz H. A.* Collected Papers.— The Hague: Nyhoff, 1937.— Vol. 5.— P. 172.
L7. *Idem.* Letter to H. Poincaré, March 8, 1906 // A. I. Miller's contribution to the Proc. of the Jerusalem Einstein Centennial Symp., March 1979.
L8. *Idem* // Acta Math.— 1921.— Vol. 38.— P. 293.
M1. *Minkowski H.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1915.— Bd 47.— S. 927.
M2. *Moszkowski A.* Einstein.— Berlin: Fontane, 1921—1922.— S. 15.
M3. *Mittag-Leffler M. G.* Letter to A. Einstein, December 16, 1919.
M4. *Idem.* Letter to A. Einstein, May 3, 1920.
P1. *Poincaré H.* // Rend. Circ. Mat. (Palermo).— 1906.— Vol. 21.— P. 129; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 494. Рус. пер.: *Пуанкаре А.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 85.

P2. *Idem* // Arch. Néerl.— 1900.— Vol. 5.— P. 252; *Oeuvres.*— Vol. 9.— P. 464.
P3. *Idem.* Sechs Vorträge aus der Reinen Mathematik und Mathematischen Physik.— Leipzig: Teubner, 1910.
P4. *Idem* // Bull. Sci. Math.— 1904 — Vol. 28.— P. 302.
P5. *Idem* // Rev. gén. sci — 1908.— Vol. 19.— P. 386; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 551.
P6. *Idem.* Letter to a colleague at the ETH, undated, November 1911.
P7. *Idem* // Scientia.— 1912.— Vol. 12.— P. 159; Dernières Pensées.— Paris: Flammarion, 1913.— Chap. 2.
P8. *Idem* // J. Phys. (Paris).— 1912.— Vol. 5.— P. 347; Dernières Pensées.— Paris: Flammarion, 1913.— Chap. 7.
S1. *Stark J.* Letter to A. Einstein, October 4, 1907 // [H1].
W1. *Whittaker E. T.* History of the Theories of Aether and Electricity.— Lond.: Longman, Green, 1910.
W2. *Idem.* History of the Theories of Aether and Electricity.— N. Y.: Nelson and Sons, 1953.— Vol. 2.
W3. *Idem* // Biogr. Mem. Fell. Roy. Soc.— 1955 — Vol. 1.— P. 37.

К гл. 9

E1. *Einstein A.* // Nature.— 1921.— Vol. 106.— P. 782. (T2.— C. 99.)
E2. *Idem.* Letter to R. W. Lawson, January 22, 1920.
E3. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411. (T1.— C. 65.)
E4. *Idem.* Letter to J. Stark, September 25, 1907 // [H1].
E5. *Idem.* Letter to J. Stark, November 1, 1907 // [H1].
E6. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 355. (T. 1.— C. 189.)
E7. *Idem.* Letter to K. Habicht, December 24, 1907. (T. 1 — C. 198)
H1. *Hermann A.* // Sudhoff's Archiv.— 1966.— Bd 50.— S. 267.
I1. *Ishiwara J.* Einstein Kōen-Roku.— Tokyo: Tokyo-Tosho, 1977.
L1. *Lawson R. W.* // Nature.— 1921.— Vol. 106.— P. 781.
L2. *Idem.* Letter to A. Einstein, November 26, 1919.

К гл. 10

D1. *Dür C.* Letter to R. Jost, November 29, 1979.
E1. *Einstein A.* Letter to M. Besso, January 1903 // EB.— P. 3.
E1a. *Idem.* Letter to M. Grossmann, January 3, 1908.
E2. *Einstein M.* Beiträge zur Überlieferung des Chevaliers du Cygne und der Enfance Godefroi.— Erlangen: Druck, 1910.
E3. *Einstein A.* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 185. (T. 3.— C. 164.)
E4. *Idem* // Ibid.— S. 807. (T. 3.— C. 181.)
E5. *Idem* // Ibid.— 1908.— Bd 9.— S. 216. (T. 3.— C. 152.)
E6. *Idem.* Letter to J. Stark, December 14, 1908; reprinted in: *Hermann A.* // Sudhoff's Archiv.— 1966.— Bd 50 — S. 267.
E7. *Idem* // EB.— P. 42, 47, 464.
E8. *Idem.* Letter to M. Besso, November 17, 1909 // EB.— P. 16.
E9. *Idem* // Arch. sci. phys. Natur.— 1910.— Vol 29.— P. 5, 125. (T. 1.— C. 138.)
E10. *Idem.* Letter to J. Laub, undated, 1908
E11. *Idem.* Letter to J. Stark, July 31, 1909; reprinted in [E6].
E12. *Idem.* Letter to M. Besso, December 31, 1909 // EB.— P. 18.
E13. *Idem.* Letter to J. Laub, December 3, 1909.
E14. *Idem.* Letter to J. Laub, March 16, 1910.
E15. *Idem.* Letter to J. Laub, undated, summer 1910.
E16. *Idem.* Letter to J. Laub, November 4, 1910.
E17. *Idem.* Letter to J. Laub, November 11, 1910.
E18. *Idem.* Letter to J. Laub, December 28, 1910.
E19. *Idem.* Letter to M. Besso, May 13, 1911 // EB — P. 19.
E20. *Idem.* Letter to A. Sommerfeld, September 29, 1909.
E21. *Idem.* The Origins of the General Theory of Relativity.— Glasgow: Jackson, Wylie, 1933. (T. 2.— C. 403.)
E22. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 259.)

E23. *Idem* // Hello Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956. (T. 4.— C. 350.)
F1. *Flückiger M.* Einstein in Bern.— Bern: Paul Haupt Verlag, 1974.
H1. *Habicht C., Habicht P.* // Phys. Zeitschr.— 1910.— Bd 11. S. 532.
P1. *Pauli W.* // [E22].— P. 149.
P2. *Idem* // Encyklopädie der Mathematische Wissenschaften.— Leipzig: Teubner Verlag, 1921.— Bd V, 2.— Sec. 56. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.
R1. *Rasche G., Staub H.* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1979.— Bd 124.— S. 205.
S1. Se.
S2. *Stoll C.* Letter to H. Ernst, March 4, 1909.
S3. *Straus E. G.* Lecture delivered at the Einstein Centennial Celebration, Yeshiva Univ., September 18, 1979.
S4. *Stachel J.* // General Relativity and Gravitation, GRG Society Einstein Centennial Volume.— N. Y.: Plenum Press, 1980.— Vol. 1.— P. 1.

К ел. 11

E1. *Einstein A.* Letter to Pauline Einstein, April 4, 1910.
E2. *Idem.* Letter to J. Laub, undated, summer 1910.
E3. *Idem.* Letter to J. Laub, October 11, 1910.
E4. *Idem.* Letter to J. Laub, December 28, 1910.
E5. *Idem.* Letter to M. Grossmann, March, 1911.
E6. *Idem.* Letter to H. Zangger, August 24, 1911.
E7. *Idem.* Letter to M. Besso, May 13, 1911 // EB.— P. 19.
E7a. *Idem.* Letter to A. Stern, March 17, 1912.
E8. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1911.— Bd 35.— S. 898. (T. 1.— C. 165.)
E9. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1907.— Bd 4.— S. 411. (T. 1.— C. 65.)
E10. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 891, Sec. 8. (T. 1.— C. 7, § 8.)
E11. *Idem.* Letter to J. Laub, August 10, 1911.
E12. *Idem.* Letter to H. Zangger, November 16, 1911.
E13. *Idem.* Letter to M. Besso, September 11, 1911 // EB.— P. 26.
E14. *Idem.* Letter to M. Besso, September 21, 1911 // EB.— P. 32.
E15. *Idem.* Letter to M. Besso, December 26, 1911 // EB.— P. 40.
E16. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 355. (T. 1.— C. 189.)
E17. *Idem* // Ibid.— S. 443. (T. 1.— C. 202.)
E18. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, June 7, 1912.
E19. *Idem* // Viertelj. Shrift Ger. Medizin.— 1912.— Bd 44.— S. 37. (T. 1.— C. 223.)
F1. *Frank P.* Albert Einstein, Sein Leben und Seine Zeit.— Braunschweig: Vieweg, 1979.
H1. *Havránek J.* // Acta Univ. Carolinae.— 1977.— Vol. 17.— P. 105.
J1. *Jost R.* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1979.— Bd 124.— S. 7.
J2. *Jaki S.* // Found. Phys.— 1978.— Vol. 8.— P. 927.
K1. *Kleiner A.* Letter to an unidentified colleague, January 18, 1911. The original is in the Staatsarchiv des Kantons Zürich.
K2. *Klein M. J.* Paul Ehrenfest.— Amsterdam: North Holland, 1970.— Vol. 1.
L1. *Lorentz H. A., Einstein A., Minkowski H., Weyl H.* // The Principle of Relativity/A. Sommerfeld, Ed.— N. Y.: Dover.
L2. *Lenard P.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1921.— Bd 65.— S. 593.
L3. *von Laue M.* // Ibid.— 1922.— Bd 66.— S. 283.
P1. Protokoll des Regierungsrates.— 1910.— No. 1226, July 14.
P2. Ibid.— 1911.— No. 247, February 10.
P3. *Planck M.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1906.— Bd 8.— S. 136.
S1. Se.— S. 204.
S2. *Stern O.* See: Biogr. Mem. Nat. Acad. Sci.— 1973.— Vol. 43.— P. 215.
S3. *von Soldner J. G.* // Berliner Astron. Jahrb.— 1804.— S. 161.
S4. *Stachel J.* // General Relativity and Gravitation. GRG Society Einstein Centennial Volume.— N. Y.: Plenum Press, 1980.— Vol. 1.— P. 1.

B1. *Born M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1909.— Bd 30.— S. 1.
B2. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 814.
B3. *Idem* // Ibid.— 1910.— Bd 11.— S. 233.
B4. *Брагинский В. Б., Панов В. И.* // ЖЭТФ.— 1971.— Т. 61.— С. 873.
C1. *Christoffel E. B.* // Z. Math.— 1869.— Bd 70.— S. 46.
C2. *Cartan E.* Letter to A. Einstein, June 24, 1931.
C3. Cartan — Einstein Correspondence on Absolute Parallelism/R. Debever, Ed.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1979.
E1. *Einstein A.* Letter to M. Grossmann, November 18, 1911.
E2. *Idem* // Astrophys. J.— 1926.— Vol. 63.— P. 196. (T. 4.— C. 71).
E3. *Idem.* Telegram to H. Zangger, November 20, 1911.
E4. *Idem.* Letter to H. Zangger, January 27, 1912.
E5. *Idem.* Letter to A. Stern, February 2, 1912.
E6. *Idem.* Letter to H. Zangger, spring 1912.
E7. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, November 23, 1911.
E8. *Idem.* Letter to H. Zangger, February 29, 1912.
E9. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, undated, 1913.
E10. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 443. (T. 1.— C. 202.)
E11. *Idem.* Letter to M. Besso, March 26, 1912.
E12. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, undated, 1912.
E13. *Idem.* Letter to H. Zangger, May 20, 1912.
E14. *Idem.* Letter to H. Zangger, undated, 1912.
E15. *Idem.* Postcard to M. von Laue, June 10, 1912.
E16. *Idem.* Letter to L. Hopf, June 12, 1912.
E17. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 1059. (T. 1.— C. 217.)
E18. *Idem.* Letter to L. Hopf, August 16, 1912.
E19. *Idem* // Hello Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956.— P. 10. (T. 4.— C. 351.)
E20. Einstein a Praha/J. Bicak, Ed.— Prague: Prometheus, 1979.— P. 42.
E21. *Einstein A.* Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.— Leipzig: Barth, 1916.— S. 6. (T. 1.— C. 452.)
E22. *Idem.* Geometrie und Erfahrung.— Berlin: Springer, 1921; PAW.— 1921.— S. 123. (T. 2.— C. 83.)
E23. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, June 7, 1912.
E24. *Idem* // Viertelj. Schrift Ger. Medizin.— 1912.— Bd. 44.— S. 37. (T. 1.— C. 233.)
E25. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E26. *Ehrenfest P.* // Ibid.— S. 918.
E27. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1916.— Bd 49.— S. 769. (T. 1.— C. 452.)
E28. *Einstein A.* Letter to A. Sommerfeld, October 29, 1912 // Einstein — Sommerfeld Briefwechsel/A. Hermann, Ed.— Stuttgart: Schwabe Verlag, 1968.— S. 26.
E29. *Einstein A., Grossmann M.* // Z. Math. Phys.— 1913.— Bd 62.— S. 225. (T. 1.— C. 227.)
E30. *Einstein A.* // PAW.— 1914.— S. 1030. (T. 1.— C. 326.)
E31. *Idem* // Hello Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956. (T. 4.— C. 350.)
E32. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, undated, 1913.
E33. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, May 28, 1913.
E34. *Idem* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1913. Bd 58.— S. 284. (T. 1.— C. 267.)
E35. *Einstein A., Grossmann M.* // Z. Math. Phys.— 1914.— Bd 63.— S. 215. (T. 1.— C. 399.)
E36. *Einstein A.* Letter to E. Cartan, June 13, 1931.
E37. *Idem.* Letter to Mrs. M. Grossmann, September 26, 1936.
F1. *Frank P.* Albert Einstein; Sein Leben und Seine Zeit.— Braunschweig: Vieweg, 1979.— S. 141.
G1. *Grossmann M.* // Proc. of the 5th Intern. Congr. of Mathematicians, August 1912.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1913.— P. 66.
G2. *Idem* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1913. Bd 58.— S. 291.
G3. *Idem* // Ibid.— 1931.— Bd 76.— S. 42.

H1. *Herglotz G.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1909.— Bd 31.— S. 393.
I1. *Ishiwara J.* Einstein Kōen-Roku.— Tokyo: Tokyo-Tosho, 1977.
K1. *Kollros L.* // Verh. Schw. Naturforsch. Ges.— 1934.— Bd 115.— S. 522.
K2. *Idem* // Helv. Phys. Acta Suppl.— 1956.— Vol. 4.— P. 271
K3. *Klein F.* Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert.— N. Y.: Springer, 1979.— Bd 2.— S. 189.
L1. *Lorentz H. A.* Letter to A. Einstein, December, 6, 1911.
L2. *Lamb H.* Hidrodynamics.— 6th ed.— N. Y.: Dover.— P. 12.
M1. *Misner C., Thorne K., Wheeler J.* Gravitation.— San Francisco: Freeman, 1973.— P. 393. Рус. пер.: *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация: Пер. с англ.— М.: Мир, 1977.
P1. *Pauli W.* // Encyklopadie der Mathematischen Naturwissenschaften.— Leipzig: Teubner, 1921.— Bd V, 2.— Sec. 45. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.
R1. *Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H.* // Ann. Phys.— 1964.— Vol. 26.— P. 442.
R2. *Ricci G., Levi-Civita T.* // Math. Ann.— 1901.— Vol. 54.— P. 125.
S1. *Saxer W.* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.—1936.—Bd 81.—S. 322.
S2. Se.
S3. *Straus E. G.* Discussion with A. Pais, December 11, 1979.
S3. *Struik D. J.* // Isis.— 1932.— Vol. 19.— P. 92; 1933.— Vol. 20.— P. 161.
W1. *Weinberg S.* Gravitation and Cosmology.— N. Y.: Wiley, 1972. Рус. пер.: *Вейнберг С.* Гравитация и космология: Пер. с англ.— М.: Мир, 1975.

К гл. 13

A1. *Abraham M.* // Jahrb. Rad Elektr.— 1914.— Bd 11.— S. 470.
A2. *Idem* // Arch. Math. Phys.— 1912.— Vol. 20.— P. 193.
A3. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1912.— Bd 13.— S. 1, 4.
A4. *Idem* // Ibid.— S. 310.
A5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 1056.
A6. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1913.— Bd 14.— S. 793.
A7. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 39.— S. 444.
B1. *Born M., von Laue M.* // Phys. Zeitschr.— 1923.— Bd 24.— S. 49.
D1. *Dicke R. H.* // Ann. Phys.— 1965.— Vol. 31.— P. 235.
E1. *Einstein A., Grossmann M.* // Z. Math. Phys.— 1913.— Bd 62.— S. 225. (T. 1.— C. 227.)
E2. *Einstein A.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 38.— S. 355, 443. (T. 1.— C. 189, 202.)
E3. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, August 14, 1913.
E3a. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1916.— Bd 51.— S. 639. (T. 1.— C. 505.)
E4. *Idem* // Ibid.— 1911.— Bd 35.— S. 898. (T. 1.— C. 165.)
E5. *Idem* // Ibid.— 1912.— Bd 38.— S. 355, sec. 4. (T. 1.— C. 189, разд. 4.)
E6. *Idem* // Ibid.— S. 1059 (T. 1.— C. 217.)
E7. *Idem* // Ibid.— 1912.— Bd 39.— S. 704. (T. 1.— C. 222.)
E8. *Idem.* Letter to L. Hopf, August 16, 1912.
E9. *Idem.* Letter to M. Besso, late 1913 // E12.— P. 50.
E10. *Idem.* Two letters to H. Zangger; one, undated, from late 1913 or early 1914 and the other dated July 7, 1915.
E11. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1913.— Bd 14.— S. 1249; 1914.— Bd 15.— S. 168. (T. 1.— C. 273, 299.)
E12. *Idem* // Scientia.— 1914.— Vol. 15.— P. 337. (T. 1.— C. 385.)
E13. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1914.— Bd 15.— S. 176. (T. 1.— C. 319.)
E14. *Idem.* Letter to H. Zangger, undated, late 1913 or early 1914.
E15. *Idem.* Letter to E. Freundlich, undated, early 1914.
E16. *Idem.* Letter to H. Zangger, March 10, 1914.
E17. *Idem* // Albert Einstein, Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed./N. Y.: Tudor, 1949.— P. 63—65. (T. 4.— C. 259.)
E18. *Einstein A., Fokker A. D.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1914.— Bd 44.— S. 321. (T. 1.— C. 305.)
F1. *Fokker A. D.* // Phys. Zeitschr.— 1914.— Bd 15.— S. 96.
G1. *Gans R.* // Ibid.— 1905.— Bd 6.— S. 803.

H1. *Heaviside O.* Electromagnetic Theory.— 3rd ed.— N. Y.: Chelsea, 1971.— Vol. 1.— P. 455
K1. *Kottler F.* // Wiener Ber.— 1912.— Bd 121.— S. 1659.
L1. *Lorentz H. A.* Collected Works.— The Hague: Nyhoff, 1937.— Vol. 5.— P. 198.
L2. *von Laue M.* Das Relativitätsprinzip.— 2nd ed.— Braunschweig: Vieweg, 1913.— S. 208.
M1. *Maxwell J. C.* Collected Papers.— N. Y.: Dover, 1952.— Vol. 1.— P. 570.
M2. *Minkowski H.* // Goett. Nachr.— 1908.— S. 53.— Anhang.
M3. *Mie G.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1913.— Bd 40.— S. 1, sec. 5.
M4. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1914.— Bd 15.— S. 115, 169.
N1. *Nordström G.* // Ibid.— 1912.— Bd 13.— S. 1126.
N2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1913.— Bd 40.— S. 856.
N3. *Idem* // Ibid.— 1913.— Bd 42.— S. 533.
P1. *Poincaré H.* // Oeuvres.— Vol. 9.— P. 551.
P2. *Idem* // Ibid.— P. 494, sec. 9.
W1. *Wacker F.* // Phys. Zeitschr.— 1906.— Bd 7.— S. 300.
W2. *Wellner M., Sandri G.* // Amer. J. Phys.— 1963.— Vol. 28.— P. 36.

К гл. 14

A1. *Arvidsson G.* // Phys. Zeitschr.— 1920.— Bd 21.— S. 88.
B1. *Barnett S. J.* // Physica.— 1933.— Vol. 13.— P. 241; Phys. Zeitschr.— 1934.— Bd 35.— S. 203; Rev. Mod. Phys.— 1935.— Vol. 7.— P. 129.
B2. *Idem* // Phys. Rev.— 1915.— Vol. 6.— P. 239.
B3. *Bohr N.* // Philos. Mag.— 1915.— Vol. 30.— P. 394.
B4. *Barnett S. J.* // Phys. Rev.— 1917.— Vol. 10.— P. 7.
B5. *Beck E.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1919.— Bd 60.— S. 109.
B6. *Braunbek Cf. W.* // Phys. Zeitschr.— 1922—.Bd 23.— S. 307; the discussion at the end of [H1a].
C1. *Chazy J.* La Théorie de la Relativité et la Mécanique Céleste.— Paris: Gauthier-Villars, 1928.— Chap. 4.
D1. Dictionary of Scientific Biography.— N. Y.: Scribner's, 1971.— Vol. 4.— P. 324, 327.
E1. *Einstein A.* // PAW.— 1915.— S. 844. (T. 1.— C. 448.)
E2. *Idem.* Letter to J. Laub, July 22, 1913.
E3. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, August 14, 1913.
E4. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, undated, probably winter 1913—1914.
E5. *Idem.* Letter to H. Zangger, March 10, 1914.
E6. *Idem* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1914.— Bd 59.— S. 4. (T. 1.— C. 317.)
E7. *Idem.* Letter to M. Besso, early March 1914 // EB.— P. 52.
E7a. *Idem.* Letter to C. Seelig, May 5, 1952.
E8. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, April 10, 1914.
E9. *Idem.* Letter to H. Zangger, July 7, 1915.
E10. *Idem* // Die Vossische Zeitung.— 1914.— April 26. (T. 1.— C. 395.)
E11. *Idem* // Kultur der Gegenwart/E. Lecher, Ed.: — Leipzig: Teubner, 1915.— Bd 3. (T. 1.— C. 410.)
E12. *Idem* // Ibid. (T. 3.— C. 336.)
E13. *Idem* // PAW.— 1914.— S. 739.— (T. 4.— C. 14.)
E14. *Idem.* Letter to H. Zangger, undated, probably spring 1915.
E15. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, December 18, 1917.
E16. *Idem* // PAW.— 1914.— S. 1030. (T. 1.— C. 326.)
E17. *Einstein A., Grossmann M.* // Z. Math. Phys.— 1913.— Bd 62.— S. 225 (T. 1.— C. 227.)
E18. *Einstein A.* // Ibid.— 1914.— Bd 63.— S. 215. (T. 1.— C. 399.)
E19. *Einstein A.* Letter to H. A. Lorentz, January 1, 1916.
E20. *Idem.* Letter to T. Levi-Civita, April 14, 1915.
E21. *Idem.* Letter to P. Straneo, January 7, 1915.
E22. *Idem* // PAW.— 1915.— S. 315.
E23. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1915.— Bd 47.— S. 879. (T. 3.— C. 352.)
E24. *Idem.* Letter to M. Besso, February 12, 1915 // EB.— P. 57.

C1. *Caves C., Thorne K., Drever R. e. a.* // Rev. Mod. Phys.— 1980.— Vol. 52.— P. 341.
C2. *Cohen I. B.* // Sci. Amer.— 1955.— July.— P. 69.
D1. *Dick A.* // Elem. Math. Beiheft — 1970.— P. 13.
E1. *Einstein A.* // PAW — 1915.— S. 831. (T. 1.— C. 439.)
E2. *Idem* The Origins of the General Theory of Relativity.— Glasgow: Jackson, Wylie, 1933 (T. 2.— C. 433.)
E3. *Ehrenfest P.* Letter to H. A. Lorentz, December 23, 1915.
E4. *Idem.* Letters to H. A. Lorentz, January 12 and 13, 1916.
E5. *Einstein A.* Letter to H. A. Lorentz, January 17, 1916.
E6. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1916.— Bd 49.— S. 769. (T. 1.— C. 452.)
E7. *Idem.* Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.— Leipzig: Barth, 1916. (T. 1.— C. 452.)
E8. *Einstein A., Minkowski H.* The Principle of Relativity.— Calcutta: Univ. of Calcutta, 1920. (T. 1 — C. 452.)
E8a. *Einstein A.* Uber die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie Gemeinverständlich.— Braunschweig: Vieweg, 1917. (T. 1.— C. 530.)
E9. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, January 1, 1916.
E10. *Idem* // Forum Philos.— 1930 — Bd 1.— S. 173. (T. 2.— C. 275.)
E11. *Idem* // The Yale University Library Gazette.— 1930.— Vol. 6.— P. 3. (T. 2.— C. 344.)
E12. *Idem* // Die Quelle.— 1932 — Bd 82.— S. 440. (T. 2 — C. 399.)
E12a. *Eddington A. S.* Space, Time and Gravitation.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1920.
E12b. *Einstein A.* // Science.— 1930.— Vol. 84 — P. 506. (T. 2.— C. 436.)
E13. *Idem* // PAW.— 1914.— S. 1030, sec. 13. (T. 1.— C. 326, § 13.)
E14. *Idem* // Ibid.— 1915.— S. 778. (T. 1.— C. 425.)
E15. *Idem* // Ibid.— S. 844. (T. 1.— C. 448.)
E16. *Idem* // Ibid.— 1916.— S. 1111. (T. 1 — C. 524.)
E17. *Eddington A.* Espace, Temps et Gravitation. Partie Théorique.— Paris: Hermann, 1921.— P. 89.
E18. *Einstein A.* Letter to «New York Times», May 4, 1935. (T. 4 — C. 198.)
E19. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1918.— Bd. 19.— S. 115, 176. (T. 1.— C. 626, 629.)
E19a. *Idem* // PAW.— 1918.— S. 448. (T. 1.— C. 650.)
E20. *Idem* // Ibid.— 1916 — S. 688.— (T. 1.— C. 514.)
E21. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1916.— Bd 18.— S. 318; Mitt. Phys. Ges. Zürich.— 1916.— Bd 16.— S. 47. (T. 3.— C. 386, 393.)
E22. *Idem* // PAW.— 1918 — S. 154. (T. 1.— C. 631.)
E23. *Einstein A., Rosen N.* // J. Franklin Inst.— 1937.— Vol. 223.— P. 43. (T. 2.— C. 438.)
E24. *Eddington A. S.* The Mathematical Theory of Relativity.— 2nd ed.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1960.— P. 130.
E25. *Ehlers J., Rosenblum A., Goldberg J., Havas P.* // Astrophys. J.— 1976.— Vol. 208.— P. L77.
E26. *Einstein A.* // Naturwiss.— 1916.— Bd 17.— S. 101 (T. 4.— C. 27.)
E27. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 259.)
E28. *Idem.* Letter to M. Besso, March 6, 1952 // EB.— P. 464.
E29. *Idem.* Letter to E. Mach. August 9, 1909.
E30. *Idem.* Letter to E. Mach. August 17, 1909.
E31. *Idem* // PAW.— 1916 — S. 98
E32 *Idem.* Letter to E. Mach, undated, around January 1913.
E33. *Idem.* Letter to A. Weiner, September 18, 1930.
E34. *Idem.* Letter to C. B. Weinberg. December 1, 1937.
E35. *Idem* // Bull. Soc. Fran. Philos.— 1922.— Vol. 22.— P. 91; Nature.— 1923.— Vol. 112 — P. 253.
E36. *Idem* // Viertelj. Schrift Ger. Medizin.— 1912.— Bd 44.— S. 37. (T. 1.— C. 223.)

E37. *Einstein A., Grossmann M.* // Z. Math. Phys.— 1913.— Bd 62.— S. 225; *Einstein A.* // Vierelj. Schrift Naturforsch. Ges. Zürich.— 1914.— Bd 59.— S. 4. (T. 1.— C. 227, 317.)
E38. *Einstein A.* Letter to E. Mach, June 25, 1913.
E39. *Einstein A.* // Phys. Zeitschr.— 1913.— Bd. 14.— S. 1249, Sec. 9. (T. 1.— C. 273, § 9).
E40. *Idem* // PAW.— 1917.— S. 142. (T. 1.— C. 601.)
E41. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, February 4, 1917.
E41a. *Idem.* Letters to M. Besso, December 1916, August 20, 1918 // EB.— P. 96, 134.
E42. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1918.— Bd 55.— S. 241; Naturwiss.— 1920.— Bd 8.— S. 1010. (T. 1.— C. 613.)
E42a. *Idem* // Ibid.— 1922.— Bd 69.— S. 436. (T. 2.— C. 112.)
E42b. *Idem* // PAW.— 1918.— S. 270. (T. 1.— C. 647.)
E43. *Idem* // Ibid.— 1919.— S. 349, 463. (T. 1.— C. 664.)
E44. *Idem* // Math. Ann.— 1927.— Vol. 97.— P. 99. (T. 2.— C. 183.)
E45. *Idem* // Z. Phys.— 1922.— Bd 11.— S. 326. (T. 2.— C. 118.)
E46. *Idem* // Ibid.— 1923.— Bd 16.— S. 228. (T. 2.— C. 119.)
E47. *Idem.* Letter to H. Weyl, May 23, 1923.
E48. *Idem* // PAW.— 1931.— S. 235. (T. 2.— C. 349.)
E49. *Einstein A., de Sitter W.* // Proc. Nat. Acad. Sci.— 1932.— Vol. 18.— P. 213. (T. 2.— C. 396.)
E50. *Einstein A.* The Meaning of Relativity.— 5th ed.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1955.— P. 127. (T. 2.— C. 5.)
E51. *Idem.* Letter to F. Pirani, February 2, 1954; *Sciama D.* // [W3].— P. 396.
E52. *Einstein A.* Letter to H. Weyl, January 3, 1917.
E53. *Idem* // Ann. Math.— 1939.— Vol. 40.— P. 922. (T. 2.— C. 514.)
E54. *Einstein A., Rosen N.* // Phys. Rev.— 1935.— Vol. 48.— P. 73. (T. 2.— C. 424.)
E55. *Einstein A.* // James Clerk Maxwell.— N. Y.: Macmillan, 1931.— P. 66. (T. 4.— C. 136.)
E56. *Einstein A., Grommer J.* // PAW.— 1927.— S. 2. (T. 2.— C. 198.)
E57. *Ehlers J.* Ed. Isolated Gravitating Systems. Varenna Lectures.— Bologna: Societa Italiana di Fisica, 1979.— Vol. 67.
E58. *Einstein A.* Letter to H. Weyl, April 26, 1927.
E59. *Einstein A., Infeld L., Hoffmann B.* // Ann. Math.— 1938.— Vol. 39.— P. 65. (T. 2.— C. 450.)
E60. *Iidem* // Ibid.— 1940.— Vol. 41.— P. 455. (T. 2.— C. 532.)
E61. *Ehlers J.* // Ann. N. Y. Acad. Sci.— 1980.— Vol. 336.— P. 279.
F1. *Фридман А.* Избранные труды.— М.: Наука, 1966.— С. 229.
G1. *Goenner H. F.* // Grundlagenproblemen der modernen Physik.— Mannheim: BI Verlag, 1981.
H1. *Hawking S. W., Israel W.*, Eds. General Relativity an Einstein Century Survey.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979.
H2. *Held A.* Ed. General Relativity and Gravitation.— N. Y.: Plenum Press, 1980.
H3. *Hubble E. P.* // Astrophys. J.— 1925.— Vol. 62.— P. 409; 1926.— Vol. 63.— P. 236; Vol. 64.— P. 321.
H3a. *Idem* // Proc. Nat. Acad. Sci.— 1929.— Vol. 15.— P. 169.
H4. *Hilbert D* // Goett. Nachr.— 1915.— S. 395. Рус. пер.: *Гильберт Д.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 133.
H5. *Idem* // Goett. Nachr.— 1917.— S. 53.
H6. *Harward A. E.* // Philos. Mag.— 1922.— Vol. 44.— P. 380.
H7. *Herneck F.* Einstein und Sein Weltbild.— Berlin: Verlag der Morgen, 1976.
H8. *Holton G.* Thematic Origins of Scientific Thought.— Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 1973.— P. 219.
H9. *Honl H.* Einstein Symposium 1965.— Berlin: Akad. Verlag, 1966.— S. 233.
H10. *Havas P.* // Isolated Systems in General Relativity/J. Ehlers, Ed.— Amsterdam: North Holland, 1979.— P. 74.
J1. *Jeffery G. B.* // Philos. Mag.— 1922.— Vol. 43.— P. 600.
K1. *Kruskal M. D.* // Phys. Rev.— 1960.— Vol. 119.— P. 1743.

K2. *Klein F.* // Goett. Nachr.— 1918.— S. 71; reprinted in: *Klein F.* Gesammelte Mathematische Abhandlungen/R. Fricke, A. Ostrowski, Eds.— Berlin: Springer, 1921.— Bd 1.— S. 568.
K3. *Idem* // Ibid.— Sec. 8 (esp. footnote 14).
K4. *Idem* // Goett. Nachr.— 1917.— S. 469; reprinted in [K2].— Bd 1.— S. 553.
L1. *Levi-Civita T.* // Rend. Circ. Mat. (Palermo).— 1917.— Vol. 42.— P. 173
L2. *Lecat M.* Bibliographie de la Relativité.— Brussels: Lamertin, 1924.
L2a. *Landau L. D.* // Nature.— 1938.— Vol. 141.— P. 333.
L3. *Lorentz H. A.* Letters to P. Ehrenfest, January 10 and 11, 1916.
L4. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, January 22, 1916.
L5. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля.— 7-е изд.— М.: Наука, 1988.
L6. *Lorentz H. A.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1900.— Vol. 8.— P. 603; Collected Works.— The Hague: Nyhoff, 1937.— Vol. 5.— P. 193.
M1. *Munitz M. K.* Theories of the Universe.— Glencoe, Ill.: The Free Press, 1957.
M2. *Misner C., Thorne K., Wheeler J.* Gravitation.— San Francisco: Freeman, 1973. Рус. пер.: *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация: Пер. с англ.— М.: Мир, 1977.
M3. *Mehra J.* The Solvay Conferences on Physics.— Boston: Reidel, 1975.— Chap. 15.
M4. *Mandl R. W.* Letter to A. Einstein, May 3, 1936.
M5. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 18, 1936.
M6. *Mach E.* Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, Historisch Kritisch Dargestellt.— Leipzig: Brokhaus, 1883. English transl.: *Mach E.* The Science of Mechanics.— 4th ed.— Chicago: Open Court, 1919.
M7. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1910.— Bd 11.— S. 599.
M8. *Idem.* The Principles of Physical Optics, preface.— Lond.: Methuen, 1926.
M9. *Idem.* History and Root of the Principle of the Conservation of Energy.— 2nd ed.— Chicago: Open Court, 1911.— P. 78, 79.
N1. *North J. D.* The Measure of the Universe.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1965.
N2. Nature.— 1921.— Vol. 106.— Issue of February 17.
N3. *Noether E.* // Goett. Nachr.— 1918.— S. 37, 235.
O1. *Oppenheimer J. R., Serber R.* // Phys. Rev.— 1938.— Vol. 54.— P. 540.
O2. *Oppenheimer J. R., Volkoff G. M.* // Ibid.— 1939.— Vol. 55.— P. 374. Рус. пер.: *Оппенгеймер Р., Волков Дж.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 337.
O3. *Oppenheimer J. R., Snyder H.* // Phys. Rev.— 1939.— Vol. 56. P. 455. Рус. пер.: *Оппенгеймер Р., Снайдер Х.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 353.
P1. *Pauli W.* Relativitätstheorie. Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften.— Leipzig: Teubner, 1921. English transl.: *Pauli W.* Theory of Relativity.— Lond.: Pergamon Press, 1958. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.
P2. *Poincare H.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1905.— Vol. 140.— P. 1504; Oeuvres.— Vol. 9.— P. 489.
R1. *Robertson H. P.* // Rev. Mod. Phys.— 1933.— Vol. 5.— P. 62.
R2. *Rosenblum A.* // Phys. Rev. Lett.— 1978.— Vol. 41.— P. 1003.
S1. *Shepley L. S., Strassenberg A. A.* Cosmology.— Stony Brook, N. Y.: AAPT, 1979.
S2. *Smarr L. L.*, Ed. Sources of Gravitational Radiation.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979.
S3. *Shaviv G., Rosen J.*, Eds. Relativity and Gravitation.— N. Y.: Wiley, 1975.
S4. *Szekeres G.* // Pub. Mat. Debrecen.— 1960.— Vol. 7.— P. 285.
S5. *Sciama D. W.* Letter to A. Pais, October 16, 1979.
S6. *Shapiro I. I.* See [W3].— P. 115.
S6a. *Sanitt N.* // Nature.— 1971.— Vol. 234.— P. 199.
S7. *Sommerfeld A.* Ed. The Principle of Relativity.— N. Y.: Dover.
S8. *Schouten J.* Ricci-Calculus.— 2nd ed.— Berlin: Springer, 1954.— P. 146.
S9. *Schouten J., Struik D. J.* // Philos. Mag.— 1924.— Vol. 47.— P. 584.
S10. *Schoen R., Yau S. T.* // Phys. Rev. Lett.— 1979.— Vol. 43.— P. 1457.

S11. Se — P. 93.
S12. *de Sitter W.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1917.— Vol. 19.— P. 527; footnote on p. 531, 532.
S13. *Sciama D.* See [W3].— P. 387.
S14. *de Sitter W.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1917.— Vol. 19.— P. 1217; Vol. 20.— P. 229.
T1. *Tolman R. C.* // Phys. Rev.— 1930.— Vol. 55.— P. 364.
T2. *Trautman A.* // Gravitation/L. Witten, Ed.— N. Y.: Wiley, 1962.— P. 169
T3. *Thorne K.* // Rev. Mod. Phys.— 1980.— Vol. 52.— P. 285.
T4. *Idem* // Ibid.— P. 299.
T5. *Idem* // Ibid.— P. 290.
T6. *Thirring H., Lense J.* // Phys. Z.— 1918.— Bd 19.— S. 156.
W1. *Weyl H.* Space, Time and Matter.— N. Y.: Dover, 1951.
W2. *Weinberg S.* Gravitation and Cosmology.— N. Y.: Wiley, 1972. Рус. пер.: *Вейнберг С.* Гравитация и космология: Пер. с англ.— М.: Мир, 1975.
W3. *Woolf H.*, Ed. Some Strangeness in the Proportion.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
W4. *Wheeler J. A.* // Amer. Scholar.— 1968.— Vol. 37.— P. 248; Amer. Scientist.— 1968.— Vol. 56.— P. 1.
W5. *Wilkinson D. T.* See [W3].— P. 137.
W6. *Will C. M.* See [H1].— Chap. 2.
W7. *Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J.* // Nature.— 1979.— Vol. 279.— P. 381.
W8. *Weyl H.* // Scripta Math.— 1935.— Vol. 3.— P. 201.
W9. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1917.— Bd 54.— S. 117.
W10. *Witten E.* // Comm. Math. Phys.— 1981.— Vol. 80.— P. 381; *Schoen R., Yau S. T.* // Phys. Rev. Lett.— 1981.— Vol. 48.— P. 369; *Horowitz G. T., Perry M. J.* // Ibid.— P. 371.
W11. *Weber J.* // Phys. Rev.— 1960.— Vol. 47.— P. 306; Phys. Rev. Lett.— 1969.— Vol. 22.— P. 1302.
W12. *Weber J., Wheeler J. A.* // Rev. Mod. Phys.— 1957.— Vol. 29.— P. 509.
W13. *Walker M., Will C. M.* // Phys. Rev. Lett.— 1980.— Vol. 22. P. 1741.
W14. *Will C. M.* See [H1].— Chap. 2.
W15. *Weyl H.* Letter to A. Einstein, February 3, 1927.
W16. *Idem* Addendum to a paper by R. Bach // Math. Zeitschr.— 1922.— Bd 13.— S. 134.
Y1. *Young P., Gunn J. E., Kristian J. e. a.* // Astrophys. J.— 1980.— Vol. 241.— P. 507.

К гл. 16

A1. Algemeen Handelsblad.— 1919.— November 10.
B1. *Bertotti B., Brill D., Krotkov R.* // Gravitation/L. Witten, Ed.— N. Y.: Wiley, 1962.— P. 1.
B2. *Bienfait-Visser A. M.* Letter to A. Pais, February 12, 1980.
B3. *Blumenfeld K.* // Helle Zeit, dunkle Zeit.— Zürich: Europa Verlag, 1956.
B4. *Idem.* Letter to C. Weizmann, March 15, 1921; ETH Bibl. Zürich. Hs.— Bd 304.— S. 201—204.
B5. *Idem.* Im Kampf um den Zionismus.— Stuttgart: Deutsches Verlag Anst. 1968.— S. 66.
B6. *Born M.* // Einstein — Born Briefwechsel.— Munich: Nympenburger, 1969.
C1. *Chaplin C.* My Autobiography.— Lond.: The Bodley Head, 1964.
D1. *Dyson F. W.* // M. N. Roy. Astr. Soc.— 1917.— Vol. 77.— P. 445.
D2. *Dufour A.* Letter to A. Einstein, April 23, 1932.
E1. *Einstein A.* Letter to M. Besso, December 10, 1915 // EB.— P. 59.
E2. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, February 14, 1917.
E3. *Idem.* Letter to H. A. Lorentz, April 23, 1917.
E4. *Idem.* Letter to H. Zangger, March 10, 1917.
E5. *Idem.* Letter to M. Besso, May 13, 1917 // EB.— P. 114.
E6. *Idem.* Letter to M. Besso, September 3, 1917 // EB.— P. 121.
E7. *Idem.* Letter to H. Zangger, December 6, 1917.
E8. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, November 12, 1917.

E9. *Idem.* Letter to M. Besso, January 5, 1918. // EB.— P. 124.
E10. *Idem.* Letter to D. Hilbert, undated, April 1918.
E11. *Idem.* Letter to H. Zangger, undated, early 1918.
E12. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, May 8, 1918.
E13. *Idem.* Letter to M. Besso, August 20, 1918 // EB.— P. 132.
E14. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, December 6, 1918.
E15. *Idem.* Letter to M. Besso, December 4, 1918 // EB.— P. 145.
E16. *Idem.* Letter to C. Seelig, May 5, 1952.
E17. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, September 12, 1919.
E18. *Idem.* Letter to M. Besso, July 26, 1920 // EB.— P. 151.
E19. *Einstein E.* Letter to P. Ehrenfest, April 5, 1932.
E20. *Einstein A.* Letter to M. Born, undated, probably 1937 // Einstein — Born Briefwechsel.— Munich: Nymphenburger, 1969.— S. 177.
E21. *Idem* // Letters à Maurice Solovin.— Paris: Gauthier-Villars, 1956.— P. 134.
E22. *Idem.* Letter to V. Besso, March 21, 1955 // EB.— P. 537.
E23. *Idem.* Letter to P. Winteler and family, undated, May 1919.
E24. *Einstein E.* Letter to P. Ehrenfest, December 10, 1919.
E25. *Einstein A.* Letter to H. Zangger, undated, January 1920.
E26. *Idem.* Letter to H. Zangger, undated, March, 1920.
E27. *Idem.* Postcard to P. Einstein, September 27, 1919.
E28. *Idem* // Naturwiss.— 1919 — Bd 7 — S. 776 (T. 1 — C. 663.)
E29. *Idem.* Letter to M. Besso, undated, March 1914 // EB.— P. 52.
E30. *Idem* // PAW.— 1915.— S. 831. (T. 1 — C. 439.)
E31. *Idem.* Letter to A. Sommerfeld, November 28, 1915
E32. *Earman J., Glymour C.* // Hist. St. Phys. Sci.— 1980.— Vol. 11.— P. 49.
E33. *Eddington A. S.* Report on the Relativity Theory of Gravitation.— Lond.: Fleetway Press, 1918.
E34. *Idem* // M. N. Roy. Astr. Soc.— 1917.— Vol. 77.— P. 377.
E35. *Idem* // Observatory.— 1919.— Vol. 42.— P. 119.
E36. *Einstein A.* Letter to C. Stumpf, November 3, 1919
E37. *Eddington A.* Letter to A. Einstein, December 1, 1919.
E38. *Einstein A.* // Die Vossische Zeitung.— 1914.— April 26. (T. 1.— C. 395.)
E39. *Idem.* Aether und Relativitätstheorie.— Berlin: Springer, 1920. (T. 1.— C. 682.)
E40. *Idem.* Letter to J. Hadamard, September 24, 1929.
E41. *Idem.* Letter to P. Epstein, October 5, 1919.
E42. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, December 4, 1919.
E43. *Idem.* About Zionism.— N. Y.: Macmillan, 1931.
E44. *Idem* // Berliner Tageblatt.— 1920.— August 27. (T. 4.— C. 693.)
E45. *Idem.* Letter to M. Born, September 9, 1920.
E46. *Einstein A., Lenard P.* // Phys. Zeitschr.— 1921.— Bd 21.— S. 666.
E46a. *Einstein A.* Letter to M. Born, undated, autumn 1920.
E46b. *Idem.* Letter to K. Haenisch, September 8, 1920 // [K1].— Vol. 1.— P. 204.
E47. *Idem.* Letter to M. Curie, July 4, 1921.
E48. *Idem.* Letter to M. Curie, July 11, 1921.
E49. *Idem.* Letter to G. Murray, July 25, 1922.
E50. *Idem.* Letter to the Commission of Intellectual Cooperation, March 21, 1923; New York Times.— 1923.— June 28.
E51. *Idem.* Letter to G. Murray, May 30, 1924.
E52. *Einstein A., Curie M., Lorentz H. A.* // Science.— 1927.— Vol. 65.— P. 415.
E53. *Einstein A.* // Naturwiss.— 1913.— Bd 1.— S. 1077. (T. 4.— C. 9.)
E53a. *Idem* // Ibid.— 1914.— Bd 2.— S. 1018. (T. 4.— C. 17.)
E54. *Idem* // Ibid.— 1916.— Bd 4.— S. 480. (T. 4.— C. 19.)
E55. *Idem* // Ibid.— 1917.— Bd 5.— S. 675. (T. 4.— C. 35.)
E56. *Idem* // Ibid.— 1918.— Bd 6.— S. 373. (T. 4.— C. 42.)
E57. *Idem* // Frankfurter Zeitung.— 1930.— November 9. (T. 4.— C. 121.)
E57a. *Idem.* See [E8 — E11] in Chap. 1.
E58. *Idem* // James Clerk Maxwell.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1931.— P. 66. (T. 4.— C. 136.)

E59. *Idem* // Naturwiss.— 1924.— Bd 12.— S. 601 (T. 4.— C. 63.)
E60. *Idem* // Ibid.— 1922.— Bd 10.— S. 823. (T. 4.— C. 47.)
E61. *Idem*. Mein Weltbild.— Zürich Europa, Verlag, 1953.— S. 32, 35, 39. (T. 4.— C. 334.)
E62. *Idem*. Out of My Later Years.— N. Y.: Phylosophical Library, 1950. (T. 2.— C. 715.)
E63. *Idem* // Astrophys. J.— 1926.— Vol. 63.— P. 196. (T. 4.— C. 71.)
E64. *Idem* // Science.— 1931.— Vol. 74.— P. 404.— (T. 4.— C. 134.)
E65. *Idem* // Z. Angew. Chemie.— 1931.— Bd 44.— S. 658. (T. 4.— C. 149.)
E66. *Idem* // New York Times.— 1935.— May 4. (T. 4.— C. 198.)
E67. *Idem* // Naturwiss.— 1929.— Bd 17.— S. 363. (T. 4.— C. 111.)
E68. *Idem* // Science.— 1929 — Vol. 69.— P. 249. (T. 4.— C. 112.)
E69. *Idem* // Naturwiss.— 1932.— Bd 20.— S. 913. (T. 4.— C. 173.)
E70. *Idem* // Ibid.— 1930.— Bd 18.— S. 536.
E71. *Idem* // Deutsche Literaturzeitung.— 1924.— Heft 1.— S. 20. (T. 4.— C. 67.)
E72. *Idem* // Bull. Soc. Fran. Philosophic.— 1922.— Vol. 22.— P. 91.
E73. *Idem*. Foreword to Galileo's Dialogue.— Berkeley: Univ. of California Press, 1967. (T. 4.— C. 337.)
E74. *Idem*. Introduction to Lukrez, von der Nature.— Berlin: Weidmann, 1924 (T. 4.— C. 61.)
E75. *Idem* // The Philosophy of Bertrand Russell/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1944.— P. 277. (T. 4.— C. 248.)
E76. *Idem* // Rev. Philos. France.— 1928.— Vol. 105.— P. 161. (T. 4.— C. 98.)
E77. *Idem*. Prologue to M. Planck. Where is Science Going? — N. Y.: Norton, 1932. (T. 4.— C. 152.)
E78. *Idem*. Foreword to the book: *Frank P.* Relativity, a Richer Truth.— Boston: Beacon Press, 1950. (T. 4.— C. 322).
E79. *Idem*. Letter to B. Croce, June 7, 1944.
E80. *Idem* // Science.— 1940.— Vol. 91.— P. 487. (T. 4 — C. 229.)
E81. *Idem* // Nature.— 1941.— Vol. 146.— P. 605.
E82. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, August 23, 1928.
F1. *Frank P.* Einstein, His Life and Times.— N. Y.: Knopf, 1953.— P. 124. Deutsche transl.: *Frank P.* Einstein, Sein Leben und Seine Zeit.— Braunschweig: Vieweg, 1979
G1. *Gay P.* Freud, Jews and Other Germans.— N. Y.: Oxford Univ. Press, 1978.— P. 172.
H1. *Herneck F.* Einstein Privat — Berlin: Der Morgen, 1978.— S. 29.
I1. *Ishiwara J.* Einstein Kōen-Roku.— Tokyo: Tokyo-Tosho, 1978.— P. 193.
I2. *Israel H., Ruckhaber E., Weinmann R.*, Eds. 100 Autoren Gegen Einstein.— Leipzig: Voigtlander, 1931.
K1. *Kirsten C., Treder H. J.* Einstein in Berlin.— Berlin: Akad. Verlag, 1979.— Vol. 1, documents 148—160.
K2. *Kessler H.* In the Twenties.— N. Y.: Holt, Rinehart and Winston, 1976.— P. 396.
L1. *Lorentz H. A.* Letter to A. Einstein, March 22, 1917.
L2. *Idem*. Telegram to A. Einstein, September 27, 1919.
L3. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, September 22, 1919.
L4. *Idem*. Telegram to A. Einstein, November 10, 1919.
L5. London Times.— 1921.— June 14.
L6. *Langevin J.* Cahiers Fundamenta Scientiae.— 1979.— N 93.
M1. *Moyer D. F.* // On the Path of Albert Einstein.— N. Y.: Plenum Press, 1979.— P. 55.
M2. *von Mayrhauser K.* Letter to A. Einstein, October 11, 1926.
M3. *Millikan R.* Letter to A. Einstein, October 2, 1924.
N1. New York Times.— 1914.— August 16.
N2. Nature.— 1914.— Vol. 94.— P. 66.
N3. New Catholic Encyclopedia.— N. Y.: McGraw-Hill, 1967.
N3a. Nieuwe Rotterdamsche Courant.— 1919.— November 9 and 11.
N4. New York Times.— 1919.— December 21.
N5. Ibid.— 1919.— December 3.

N6. Ibid.— 1919.— November 16.
N7. Ibid — 1928.— January 28.
N8. *Nathan O., Norden M.* Einstein on Peace.— N. Y.: Schocken, 1968.
O1. Observatory.— 1919.— Vol. 42.— P. 256.
O2. Ibid — P. 389; Proc. Roy. Soc.— 1919.— Vol. 96A, P. i.
R1. *Reiser A.* Albert Einstein.— N. Y.: Boni, 1930.
R2. *Rosenthal-Schneider I.* Reality and Scientific Truth.— Detroit: Wayno State Univ. Press, 1980.— P. 62.
S1. *Saz N.* Forschungen d. Päd. Hochsch. Karl Liebknecht. Naturw. Reihe B.— N 14.— P. 59.
S2. *de Sitter W.* // Observatory.— 1916.— Vol. 39.— P. 412.
S3. *Idem* // M. N. Roy. Astr. Soc.— 1916.— Vol. 76.— P. 699; 1917.— Vol. 77.— P. 155, 481; 1917.— Vol. 78.— P. 3, 341. Рус. пер.: *де Ситтер В.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 299.
S4. *Stumpf C.* Letter to A. Einstein, October 22, 1919.
T1. *Thomson J. J.* // Proc. Roy. Soc.— 1919.— Vol. 96A.— P. 311.
T2. *Talmey M.* The Relativity Theory Simplified.— N. Y.: Falcon Press, 1932.
U1. *Uhlenbeck G. F.* // Some Strangeness in the Proportion/H. Woolf, Ed.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.— P. 524.

К гл. 17

B1. *Bergmann P.* Introduction to the Theory of Relativity.— N. Y.: Prentice-Hall, 1942.— P. 272. Рус. пер.: *Бергман П. Г.* Введение в теорию относительности: Пер. с англ.— М.: Над-во иностр. лит., 1947.
B2. *Idem* // Phys. Today.— 1979.— March.— P. 44.
B3. *Idem* // Ann. Math.— 1948.— Vol. 49.— P. 255.
C1. *Chadwick J., Bieler E. S.* // Phylos. Mag.— 1921.— Vol. 42.— P. 923.
C2. *Chadwick J.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1914.— Bd 16.— S. 383.
C3. *Chern S.* // Some Strangeness in the Proportion/H. Woolf, Ed.— Reading, Mass: Addison-Wesley, 1980.— P. 271.
C4. *Cartan E.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1922.— Vol. 174.— P. 437, 593. Рус. пер.: *Картан Э.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 535.
T5. *Idem* // Ann. Ec. Norm.— 1923.— Vol. 40.— P. 325; 1924.— Vol. 41.— P. 1; Oeuvres Complètes.— Paris: Gauthier-Villars, 1955.— Vol. 3.— P. 569.
C6. *Idem.* Letter to A. Einstein, May 8, 1929.
C7. *Idem* // Math. Ann.— 1929.— Vol. 102.— P. 698.
D1. *Debever R.*, Ed. Elie Cartan — Albert Einstein Letters on Absolute Parallelism.— Princeton, N. Y.: Princeton Univ. Press, 1979.
E1. *Einstein A.* Letter to F. Klein, March 4, 1917.
E2. *Idem.* Letter to F. Klein, December 12, 1917.
E3. *Idem.* Letter to H. Weyl, September 27, 1918.
E4. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, April 7, 1920.
E5. *Idem.* Letter to H. Weyl, June 6, 1922.
E6. *Idem* // PAW.— 1921.— S. 882. (T. 3.— C. 430.)
E7. *Einstein A., Ehrenfest P.* // Z. Phys.— 1922.— Bd 11.— S. 31. (T. 3.— C. 442.)
E8. *Einstein A., Grommer J.* // Scripta Jerusalem Univ.— 1923.— Vol. 1, No. 7. (T. 2.— C. 130.)
E9. *Einstein A.* Letter to P. Ehrenfest, February 20, 1922.
E10. *Einstein A., Ehrenfest P.* // Z. Phys.— 1923.— Bd 19.— S. 301. (T. 3.— C. 450.)
E11. *Einstein A., Mühsam H.* // Deutsch. Medizin Wochenschr.— 1923.— Bd 49 — S. 1012. (T. 3.— C. 447.).
E12. *Einstein A.* // Naturwiss.— 1926.— Bd 14.— S. 223. (T. 4.— C. 74.)
E13. *Idem* // Ibid.— S. 300. (T. 3.— C. 514.)
E14. *Idem* // PAW.— 1926.— S. 334. (T. 3.— C. 517.)
E15. *Idem* // Ibid.— 1925.— S. 414. (T. 2.— C. 171.)
E16. *Idem.* Letter to T. Kaluza, April 21, 1919.
E17. *Idem* // PAW.— 1919.— S. 349, 463. (T. 1.— C. 664.)

E18. *Idem*. Letter to T. Kaluza, May 5, 1919.
E19. *Idem* // PAW.— 1927.— S. 23. (T. 2.— C. 190.)
E20. *Idem* // Ibid.— S. 26. (T. 2.— C. 193.)
E21. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, August 23, 1926.
E22. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, September 3, 1926.
E23. *Idem*. Letter to H. A. Lorentz, February 16, 1927.
E24. *Einstein A., Mayer W.* // PAW.— 1931.— S. 541. (T. 2.— C. 366.)
E25. *Einstein A*. Letter to P. Ehrenfest, September 17, 1931.
E26. *Idem* // Science.— 1930.— Vo. 74.— P. 438. (T. 2.— C. 347.)
E27. *Einstein A., Mayer W.* // PAW.— 1932.— S. 130. (T. 2.— C. 387.)
E28. *Einstein A*. Letter to W. Pauli, January 22, 1932.
E29. *Einstein A., Bergmann P.* // Ann. Math.— 1938.— Vol. 39.— P. 683. (T. 2.— C. 492.)
E30. *Einstein A., Bargmann V., Bergmann P.* // T. von Kármán Anniversary Volume.— Pasadena: California Inst. of Technology, 1941.— P. 212. (T. 2.— C. 543.)
E31. *Einstein A*. Letter to H. Weyl, April 8, 1918.
E32. *Idem*. Letter to H. Weyl, April 15, 1918.
E33. *Idem* // PAW.— 1918.— S. 478. Рус. пер.: *Эйнштейн А.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 525.
E34. *Idem* // PAW.— 1921.— S. 261. (T. 2.— C. 105.)
E35. *Idem* // Ibid.— 1923.— S. 32. (T. 2.— C. 134.)
E36. *Idem* // Ibid.— S. 76. (T. 2.— C. 142.)
E37. *Idem* // Ibid.— S. 137. (T. 2.— C. 145.)
E38. *Idem* // Nature.— 1923.— Vol. 112.— P. 448. (T. 2.— C. 149.)
E39. *Eddington A. S.* // Proc. Roy. Soc.— 1921.— Vol. 99.— P. 104.
E40. *Einstein A*. Letter to H. Weyl, June 6, 1922.
E41. *Idem*. Letter to H. Weyl, May 23, 1923.
E42. *Idem*. Letter to H. Weyl, May 26, 1923.
E43. *Idem*. Appendix to A. S. Eddington. Relativitätstheorie.— Berlin: Springer, 1925. (T. 2.— C. 161.)
E44. *Idem* // PAW.— 1925.— S. 414. (T. 2.— C. 171.)
E45. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, August 18, 1925.
E46. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, September 18, 1925.
E47. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, September 20, 1925.
E48. *Idem* // Math. Ann.— 1927.— Bd 97.— S. 99. (T. 2.— C. 183.)
E49. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, January 21, 1928.
E50. *Idem* // PAW.— 1928.— S. 217. (T. 2.— C. 223.)
E51. *Idem* // Math. Ann.— 1929.— Bd 102.— S. 685.
E51a. *Idem* // PAW.— 1928.— S. 224. (T. 2.— C. 229.)
E52. *Idem* // PAW.— 1929.— S. 2. (T. 2.— C. 252.)
E53. *Eddington A. S.* Letter to A. Einstein, February 11, 1929.
E54. *Einstein A.* // PAW.— 1929.— S. 156. (T. 2.— C. 270.)
E55. *Idem* // Ibid.— 1930.— S. 18. (T. 2.— C. 321.)
E56. *Idem*. Festschrift Prof. Dr. A. Stodola.— Zürich: Füssli, 1929.— S. 126. (T. 2.— C. 244.)
E57. *Idem* // Science.— 1930.— Vol. 71.— P. 608.
E58. *Idem* // Ann. Inst. H. Poincaré.— 1930.— Vol. 1.— P. 1. (T. 2.— C. 286.)
E59. *Idem* // Die Koralle.— 1930.— S. 486—487. (T. 2.— C. 283.)
E60. *Idem* // Forum Philosophicum.— 1930.— Vol. 1.— P. 173. (T. 2.— C. 275.)
E61. *Idem* // The Yale University Library Gazette.— 1930.— Vol. 6.— P. 3. (T. 2.— C. 344.)
E62. *Idem* // Die Quelle.— 1932.— Bd 82.— S. 440. (T. 2.— C. 399.)
E63. *Eddington A. S.* // Nature.— 1929.— Vol. 123.— P. 280.
E64. *Einstein A*. Letter to W. Pauli, December 24, 1929.
E65. *Idem*. Letter to W. Mayer, January 1, 1930.
E66. *Einstein A., Mayer W.* // PAW.— 1930.— S. 110. (T. 2.— C. 329.)
E67. *Einstein A.* // Ibid.— S. 401. (T. 2.— C. 342.)
E68. *Einstein A., Mayer W.* // Ibid.— 1931.— S. 257. (T. 2.— C. 353.)
E69. *Einstein A*. Letter to W. Pauli, January 22, 1932.

E70. *Idem.* On the Method of Theoretical Physics.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1933. (T. 4.— C. 181.)
E71. *Einstein A., Bargmann V.* // Ann. Math.— 1944.— Vol. 45.— P. 1. (T. 2.— C. 568.)
E72. *Einstein A.* // Ibid.— P. 15. (T. 2.— C. 586.)
E73. *Idem* // Ibid.— 1945.— Vol. 46.— P. 578. (T. 2.— C. 614.)
E74. *Idem* // Rev. Mod. Phys.— 1948.— Vol. 20.— P. 35. (T. 2.— C. 663.)
E75. *Idem* // Canad. J. Math.— 1950.— Vol. 2.— P. 120. (T. 2.— C. 732.)
E76. *Idem* // Phys. Rev.— 1953.— Vol. 89.— P. 321. (T. 2.— C. 787.)
E77. *Einstein A., Straus E.* // Ann. Math.— 1946.— Vol. 47.— P. 731. (T. 2.— C. 636.)
E78. *Einstein A., Kaufman B.* // Ibid.— 1954.— Vol. 59.— P. 230. (T. 2.— C. 818.)
E79. *Idem* // Ibid.— 1955.— Vol. 62.— P. 128. (T. 2.— C. 835.)
E80. *Einstein A.* Letter to E. Schroedinger, January 22, 1946.
E81. *Idem.* The Meaning of Relativity.— 5th ed.— Princeton, N. Y.: Princeton Univ. Press, 1955. (T. 2.— C. 5.)
E82. *Idem.* Letter to M. Grossmann, April 14, 1901.
E83. *Idem* // Sci. Amer.— 1950.— April.— P. 17. (T. 2.— C. 719.)
F1. *Fock V.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 39.— S. 226.
G1. *Gonseth F., Jurei G.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1927.— Vol. 185.— P. 448, 535.
H1. *Heisenberg W.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 33.— S. 879.
H2. *Hessenberg G.* // Math. Ann.— 1916.— Bd 78.— P. 187.
H3. *Hehl F., von der Heyde P., Kerlick G. D., Nester J.* // Rev. Mod. Phys.— 1976.— Vol. 48.— P. 393.
J1. *Jordan P.* Schwerkraft und Weltall.— 2nd ed.— Braunschweig: Vieweg, 1955.
K1. *Klein F.* Gesammelte Mathematische Abhandungen.— Berlin: Springer, 1921.— Bd 1.— S. 533.
K2. *Kaluza T.* // PAW.— 1921.— S. 966. Рус. пер.: *Калуца Т.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 529.
K3. *Klein O.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 37.— S. 895.
K4. *Idem* // Nature.— 1926.— Vol. 118.— P. 516.
K5. *Idem* // Helv. Phys. Acta.— 1956.— Suppl. IV.— P. 58.
K6. *Kaufman B.* // Ibid.— P. 227.
K7. *Kursunoglu B.* // Phys. Rev.— 1952.— Vol. 88.— P. 1369.
L1. *Lanczos C.* // Erg. Ex. Naturwiss.— 1931.— Bd 10.— S. 97.
L2. *Levi-Civita T.* // Nature.— 1929.— Vol. 123.— P. 678.
L3. *Lichnerowicz A.* Theories Relativistes de la Gravitation et de l'Electromagnetism.— Paris: Masson, 1955.— Chap. 4.
M1. *Mandel H.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 39.— S. 136.
M2. *Idem* // Ibid.— 1927.— Bd 45.— S. 285.
N1. *Nordström G.* // Phys. Zeitschr.— 1914.— Bd 15.— S. 504.
N2. Nature.— 1929.— Vol. 123.— P. 174.
N3. New York Times.— 1929.— January 12.
N4. Ibid.— February 4.
N5. Ibid.— 1949.— December 27.
N6. Ibid.— December 28.
N7. Ibid.— 1953.— March 30.
P1. *Pauli W.* Theory of Relativity.— Lond: Pergamon Press, 1958.— Suppl. Note 23. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.— Примеч. 23.
P2. *Pauli W., Solomon J.* // J. Phys. Radium.— 1932.— Vol. 3.— P. 452, 582.
P3. *Pauli W.* Collected Scientific Papers/R. Kronig, V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Intersci., 1964.— Vol. 2.— P. 461.
P4. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1933.— Bd 18.— S. 305, 337; [P3].— P. 630.
P5. *Pais A.* // Physica.— 1941.— Vol. 8.— P. 1137.
P6. *Pauli W.* Letter to A. S. Eddington, September 20, 1923 // *Pauli W.* Scientific Correspondence/A. Hermann, K. von Meyenn, V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Springer, 1979.— P. 115.

P7. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 19, 1929 // [P6].— Vol. 1.— P. 526.
P8. *Idem* // Naturwiss.— 1932.— Bd 20.— S. 186; [P3].— Vol. 2.— P. 1399.
R1. *Rutherford E.* // Proc. Roy. Soc.— 1914.— Vol. A90.— Addendum.
R2. *Idem* // Scientia.— 1914.— Vol. 16.— P. 337.
R3. *Idem.* // Philos. Mag.— 1914.— Vol. 27.— P. 488.
R4. *Idem* // Ibid.— 1919.— Vol. 37.— P. 537.
S1. *Schroedinger E.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1926.— Bd 79.— S. 361.
S2. *Schmutzer E.* Relativistische Physik.— Leipzig: Teubner, 1968.— Chap. 10.
S3. *Schroedinger E.* Space-Time Structure.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1950. Рус. пер.: *Шрёдингер Э.* Пространственно-временная структура Вселенной.— М.: Наука, 1986.
S4. *Schouten J.* Der Ricci-Kalkul.— Berlin: Springer, 1924.
S5. *Salzer H.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1973.— Vol. 12.— P. 88.
S6. *Straus E.* // Some Strangeness in the Proportion/ H. Woolf, Ed.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.— P. 483.
S7. *Idem* // Rev. Mod. Phys.— 1949.— Vol. 21.— P. 414.
S8. *Schouten J.* Ricci-Calculus.— 2nd ed.— Berlin: Springer, 1954.— Chap. 3, sec. 11.
T1. *Tonnelat M. A.* Einstein's Unified Field Theory.— N. Y.: Gordon and Breach, 1966.
W1. *Witten E.* // Nucl. Phys.— 1981.— Vol. B186.— P. 412.
W2. *Weyl H.* // PAW.— 1918.— S. 465. Рус. пер.: *Вейль Г.* // Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Пер. с нем., англ., фр.— М.: Мир, 1979.— С. 513.
W3. *Idem.* Letter to A. Einstein, April 5, 1918.
W4. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 10, 1918.
W5. *Idem.* Raum, Zeit, Materie.— 5nd ed.— Berlin: Springer, 1923.— Appendix 4.
W6. *Idem* // Z. Phys.— 1929.— Bd 56.— S. 330.
W7. *Wiener N., Vallarta M.* // Nature.— 1929.— Vol. 123.— P. 317.
Z1. *Zumino B.* Einstein Symposium Berlin.— N. Y.: Springer, 1979.— P. 114.

К гл. 18

B1. *Balmer J. J.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1885.— Bd 25.— S. 80.
C1. *Chadwick J.* // Proc. 10th Intern. Conf. on the History of Science, Ithaca.— Paris: Hermann, 1962.— Vol. 1.— P. 159.
D1. *Dirac P. A. M.* // Proc. Roy. Soc.— 1931.— Vol. A133.— P. 60.
K1. *Kirchhoff G., Bunsen R.* // Ann. Phys. Chem.— 1860.— Vol. 110.— P. 160.
K2. *Kirchhoff G.* // Ibid.— Vol. 109.— P. 275.
M1. *Millikan R. A.* // Rev. Mod. Phys.— 1949.— Vol. 21.— P. 343.
M2. *Idem* // Phys. Rev.— 1916.— Vol. 7.— P. 18.
M3. *Idem* // Ibid.— P. 355.
P1. *Pais A.* Letter dated December 9, 1948.
R1. Rev. Mod. Phys.— 1949.— Vol. 21(3).
R2. *Rutherford E.* // Proc. Roy. Soc.— 1920.— Vol. A97.— P. 374.
T1. *Thomson J. J.* Recollections and Reflections.— Lond.: Bell, 1936.— P. 341.
W1. *Weyl H.* The Theory of Groups and Quantum Mechanics.— 2nd ed.— N. Y.: Dover, 1930.— P. 263—264.

К гл. 19

A1. *Arons A. B., Peppard M. B.* // Amer. J. Phys.— 1965.— Vol. 33.— P. 367.
A2. *Arrhenius S.* // Nobel Lectures in Physics.— N. Y.: Elsevier, 1965.— Vol. 1.— P. 476.
B1. *Benz U.* Arnold Sommerfeld.— Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1975.
B2. *Bohr N.* // Philos. Mag.— 1913.— Vol. 26.— P. 1.
B3. *Idem* // Nature.— 1913.— Vol. 92.— P. 231.
C1. *Curie P., Sagnac G.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1900.— Vol. 130.— P. 1013.
D1. *Duane W., Hunt F. L.* // Phys. Rev.— 1915.— Vol. 6.— P. 166.

E1. *Einstein A.* // Forschungen und Fortschritte.— 1929.— Bd 5.— S. 243. (T. 4.— C. 109.)
E2. *Idem* // Naturwiss.— 1913.— Bd 1.— S. 1077. (T. 4.— C. 9.)
E3. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.— P. 2. (T. 4.— C. 259.)
E4. *Idem* // Out of My Later Years.— N. Y.: Philosophical Library, 1950.— P. 229. (T. 4.— C. 217.)
E5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 132. (T. 3.— C. 92.)
E6. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 14.— S. 354. (T. 3.— C. 67.)
E7. *Idem* // Ibid.— 1906.— Bd 20.— S. 199. (T. 3.— C. 128.)
E8. *Elster J., Geitel H.* // Ibid.— 1890.— Bd 41.— S. 166.
E9. *Einstein A.* // Ibid.— 1912.— Bd 37.— S. 832; Bd 38.— S. 881, 888. (T. 3.— C. 266, 272, 276.)
E10. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E11. *Idem* // Proc. of the 1st Solvay Conf./P. Langevin, M. de Broglie, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1912. (T. 3.— C. 277.)
E12. *Idem.* Letter to M. Besso, December 12, 1951 // EB.— P. 453.
H1. *Hettner G.* // Naturwiss.— 1922.— Bd 10.— S. 1033.
H2. *Hermann A.* Frühgeschichte der Quantentheorie 1899—1913.— Baden: Mosbach, 1969.— S. 32.
H3. *Hertz H.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1887.— Bd 33.— S. 983.
H4. *Hallwachs W.* // Ibid.— 1888.— Bd 35.— S. 310.
H5. *Hughes A. L.* // Trans. Roy. Soc.— 1912.— Vol. 212.— P. 205.
H6. *de Hevesy G.* Letter to E. Rutherford, October 14, 1913. Quoted in: *Eve A. S.* Rutherford.— Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1939.— P. 226.
J1. *Jeans J. H.* // Philos. Mag.— 1905.— Vol. 10.— P. 91.
J2. *Idem* // Nature.— 1905.— Vol. 72.— P. 293.
J3. *Idem* // The Electricain (Lond.).— 1914.— P. 59.
K1. *Kirchhoff G.* // Monatsber. (Berlin).— 1859.— S. 662.
K2. *Idem* // Ann. Phys. Chem.— 1860.— Vol. 109.— P. 275.
K3. *Kangro H.* History of Planck's Radiation Law.— Lond.: Taylor and Francis, 1976.
K4. *Klein M.* History of Twentieth Century Physics.— N. Y.: Academic Press, 1977.
K5. *Kirsten G., Körber H.* Physiker über Physiker.— Berlin: Akad. Verlag, 1975.
L1. *Lummer O., Pringsheim E.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1900.— Bd 2.— S. 163.
L2. *Langley S. P.* // Philos. Mag.— 1886.— Vol. 21.— P. 394.
L3. *Lorentz H. A.* Collected Works.— The Hague: Nyhoff, 1936.— Vol. 3.— P. 155.
L4. *Lenard P., Wolf M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1889.— Bd. 37.— S. 443.
L5. *Idem* // Ibid.— 1902.— Bd 8.— S. 149.
L6. *Ladenburg R.* // Jahrb. Rad. Electr.— 1909.— Bd 17.— S. 93, 273.
L7. *von Laue M.* Letter to A. Einstein, June 2, 1906.
L8. *Idem.* Letter to A. Einstein, December 27, 1907.
L9. *Lorentz H. A.* Letter to W. Wien, April 12, 1909. Quoted in [H2].— S. 68.
M1. *Millikan R. A.* // Phys. Rev.— 1914.— Vol. 4.— P. 73.
M2. *Idem* // Ibid.— 1915.— Vol. 6.— P. 55.
M3. *Idem* // Science.— 1913.— Vol. 37.— P. 119.
M4. *Idem* // Phys. Rev.— 1916.— Vol. 7.— P. 335.
M5. *Idem* // Ibid.— P. 18.
P1. *Paschen W.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1897.— Bd 60.— S. 662.
P2. *Planck M.* // M. Planck, Physikalische Abhandlungen und Vorträge/ M. von Laue, Ed.— Braunschweig: Vieweg, 1958.— Bd 3.— S. 374.
P3. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1900.— Bd 2.— S. 202; [P2].— Bd 1.— S. 687.
P4. *Idem* // Ibid.— S. 237; [P2].— Bd 1.— S. 698.
P5. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1900.— Bd 1.— S. 69; [P2].— Bd 1.— S. 614

P6. *Pauli W.* Collected Scientific Papers/R. Kronig. V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Intersci., 1964.— Vol. 1.— P. 602—607.
P7. *Planck M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 553; [P2].— Bd 1.— S. 717.
P8. *Pringsheim E.* // Arch Math. Phys.— 1903.— Vol. 7.— P. 236.
P9. *Planck M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 564; [P2].— Bd 1.— S. 728.
P10. *Pohl R., Pringsheim E.* // Philos. Mag.— 1913.— Vol. 26.— P. 1017.
P11. *Planck M.* Letter to A. Einstein, July 6, 1907.
P12. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 825.
R1. *Rubens H., Kurlbaum F.* // PAW.— 1900.— S. 929.
R2. *Rubens H., Nichols E. F.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1897.— Bd 60.— S. 418.
R3. *Rutherford E., Geiger H.* // Proc. Roy. Soc.— 1908.— Vol. A81.— P. 162.
R4. *Rayleigh J. W. S.* // Philos. Mag.— 1900.— Vol. 49.— P. 539.
R5. *Idem* // Nature.— 1905.— Vol. 72.— P. 54.
R6. *Idem* // Ibid.— P. 243.
R7. *Rutherford E.* // J. Röntgen Soc.— 1918.— Bd 14.— S. 81.
S1. *Stefan J.* // Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturwiss. Kl., 2 Abt.— 1879.— Bd 79.— S. 391.
S2. *von Schweidler E.* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1904.— Bd 1.— S. 358.
S3. *Sommerfeld A.* // Verh. Ges. Deutsch. Naturforsch. Ärzte.— 1912.— Bd 83.— S. 31.
S4. *Stuewer R. H.* The Compton Effect.— N. Y.: Sci. History, 1975.— Chap. 2.
T1. *Thomson J. J.* // Philos. Mag.— 1899.— Vol. 48.— P. 547.
T2. *Idem* // Ibid.— 1897.— Vol. 44.— P. 269.
W1. *Wien W.* // PAW.— 1893.— S. 55.
W2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig.).— 1896.— Bd 58.— S. 662.

К гл. 20

A1. *Avogadro A.* // Ann. Chim. Phys.— 1833.— Vol. 55.— P. 80 (esp. 96—98).
B1. *Behn U.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1893.— Bd 48.— S. 708.
B2. *Boltzmann L.* // Wiener Ber.— 1866.— Bd 53.— P. 195; Wa.— Bd 1.— S. 20.
B3. *Brush S. G.* The Kind of Motion We Call Heat.— Amsterdam: North Holland, 1976.— Vol. 1.— Chap. 3; Vol. 2.— Chap. 10.
B4. *Boltzmann L.* // Wiener Ber.— 1871.— Bd 63.— S. 679; WA.— Bd 1.— S. 259.
B5. *Idem* // Ibid.— 1876.— Bd 74.— S. 553; WA.— Bd 2.— S. 103.
B6. *Idem* // Nature.— 1895.— Vol. 51.— P. 413; WA.— Bd 3.— S. 535.
B7. *Born M., von Karman T.* // Phys. Zeitschr.— 1912.— Bd 13.— S. 297; 1913.— Bd 14.— S. 15.
D1. *Dewar J.* // Philos. Mag.— 1872.— Vol. 44.— P. 461.
D2. *Idem* // Proc. Roy. Soc. (Lond.).— 1905.— Vol. 76.— P. 325.
D3. *Debye P.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1912.— Bd 39.— S. 789.
E1. *Einstein A.* // Ibid.— 1907.— Bd 22.— S. 180. (T. 3.— C. 134.)
E2. *Idem* // Ibid.— S. 800. (T. 3.— C. 144.)
E3. *Idem* // Ibid.— 1911.— Bd 34.— S. 170. (T. 3.— C. 247.)
E4. *Idem* // Ibid.— 1911.— Bd 35.— S. 679. (T. 3.— C. 253.)
E5. *Eucken A.* // PAW.— 1912.— S. 141.
E6. *Einstein A., Stern O.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1913.— Bd 40.— S. 551. (T. 3.— C. 314.)
E7. *Einstein A.* // PAW.— 1920.— S. 65.
E8. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1914.— Bd 16.— S. 820. (T. 3.— C. 328.)
E9. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, April 25, 1912.
E10. *Idem* // Sci. Monthly.— 1942.— Vol. 54.— P. 195. (T. 4.— C. 242.)
E11. *Idem.* Letter to H. Zangger, May 20, 1912.
F1. *Fox R.* // Brit. J. Hist. Sci.— 1968.— Vol. 4.— P. 1.
H1. *Hermann A.* Frühgeschichte der Quantentheorie, 1899—1913.— Baden: Mosbach, 1969.

H2. *Huang K.* Statistical Mechanics.— N. Y.: Wiley, 1963.— P. 26.
K1. *Kundt A., Warburg E.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1876.— Bd 157.— S. 353.
K2. *Kelvin.* Baltimore Lectures.— Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press, 1904.
K3. *Klein M.* // Science.— 1965.— Vol. 148.— P. 173.
L1. *Lewis G. N.* // J. Amer. Chem. Soc.— 1907.— Vol. 29.— P. 1165, 1516.
L2. *Landolt H., Bornstein R.* Physikalisch Chemische Tabellen.— 3rd ed.— Berlin: Springer, 1905.— S. 384.
M1. *Maxwell J. C.* The Scientific Papers of J. C. Maxwell/W. P. Niven, Ed.— N. Y.: Dover, 1952.— Vol. 1.— P. 377.
N1. *Neumann F. E.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1831.— Bd 23.— S. 32.
N2. *Nernst W.* // PAW.— 1911.— S. 306.
N3. *Idem* // Goett. Nachr.— 1906.— S. 1.
N4. *Idem* // PAW.— 1906.— S. 993.
N5. *Idem* // Ibid.— 1910.— S. 262.
N6. *Idem* // Ibid.— 1911.— S. 65.
N7. *Nernst W., Lindemann F.* // Ibid.— 1911.— S. 494.
N8. *Nernst W.* // Z. Electrochem.— 1914.— Bd 20.— S. 397.
P1. *Petit A. T., Dulong P. L.* // Ann. Chem. Phys.— 1819.— Vol. 10.— P. 395.
P2. *Planck M.* Vorlesungen über Thermodynamik.— 3rd ed.— Leipzig: von Veit, 1911.— Introduction and sec. 292.
R1. *de la Rive A., Marcet F.* // Ann. Chim. Phys.— 1840.— Vol. 75.— P. 113.
R2. *Regnault H. V.* // Ibid.— 1841.— Vol. 1.— P. 129 (esp. 202—205).
R3. *Richarz F.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1893.— Bd 48.— S. 708.
R4. *Rayleigh J. W. S.* // Phylos. Mag.— 1900.— Vol. 49.— P. 98.
S1. *Sommerfeld A.* Gesammelte Schriften.— Braunschweig: Vieweg, 1968.— Bd 3.— S. 10.
S2. *Simon F.* // Yearbook Phys. Soc. (Lond.).— 1956.— P. 1.
W1. *Weber H. F.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1872.— Bd 147.— S. 311.
W2. *Idem* // Ibid.— 1875.— Bd 154.— S. 367, 533.
W3. *Wigand A.* // Ibid.— 1907.— Bd 22.— S. 99.
W4. *Wüllner A.* Lehrbuch der Experimentalphysik.— Leipzig: Teubner, 1896.— Bd 2.— S. 507.

К ст. 21

A1. *Allison S. K.* // Biogr. Mem. Nat. Acad. Sci.— 1965.— Vol. 38.— P. 81.
B1. *Born M., Heisenberg W., Jordan P.* // Z. Phys.— 1925.— Bd 35.— S. 557.
B2. *Berry M. V.* // Ann. N. Y. Acad. Sci.— 1980.— Vol. 357.— P. 183.
C1. *Compton A. H.* // Phys. Rev.— 1923.— Vol. 21.— P. 483.
D1. *Davis L., Goldhaber A. S., Nieto M. M.* // Phys. Rev. Lett.— 1975.— Vol. 35.— P. 1402.
D2. *Debye P.* // Phys. Zeitschr.— 1923.— Bd 24.— S. 161.
E1. *Einstein A.* Letter to J. Laub, undated, 1908. Quoted in Sc.— S. 103.
E2. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 185. (T. 3.— C. 164.)
E3. *Idem* // Ibid.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E4. *Idem.* Letter to A. Sommerfeld, September 29, 1909.
E5. *Ehrenfest P.* // Z. Phys.— 1925.— Bd 34.— S. 362.
E6. *Einstein A.* Letter to M. Besso, May 13, 1911 // EB.— S. 19.
E7. *Idem* // La Théorie du Rayonnement et les Quanta/P. Langevin, M. de Broglie, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1912.— P. 407.
E8. *Idem.* Letter to M. Besso, November 18, 1916 // EB.— S. 78.
E9. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1916.— Bd 18.— S. 318. (T. 3.— C. 386.)
E10. *Idem* // Mitt. Phys. Ges. (Zürich).— 1916.— Bd 16.— S. 47. (T. 3.— C. 393.)
E11. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1917.— Bd 18.— S. 121.
E12. *Einstein A., Hopf L.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1910.— Bd 33.— S. 1105. (T. 3.— C. 205.)
E13. *Einstein A.* Letter to M. Besso, September 6, 1916 // EB.— S. 82.
E14. *Idem.* Letter to M. Besso, July 29, 1918 // EB.— S. 130.
E15. *Idem.* Letter to M. Besso, March 9, 1917.
E16. *Idem.* Letter to M. Born, January 27, 1920 // The Born — Einstern Letters.— N. Y.: Walker, 1971.— P. 23.

E17. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1917.— Bd 19.— S. 82. (T. 3.— C. 407.)
E18. *Idem* // PAW.— 1917.— S. 606. (T. 3.— C. 417.)
E19. *Idem* // Ibid.— 1921.— S. 882. (T. 3.— C. 430.)
E20. *Idem* // Ibid.— 1922.— S. 18. (T. 3.— C. 437.)
E21. *Idem*. Letter to M. Besso, May 24, 1924 // EB.— S. 201.
E22. *Einstein A., Ehrenfest P.* // Z. Phys.— 1922.— Bd 11.— S. 31. (T. 3.— C. 442.)
E23. *Iidem* // Z. Phys.— 1923.— Bd 19.— S. 301. (T. 3.— C. 450.)
E24. *Einstein A.* // Berliner Tagelblatt, April 20, 1924. (T. 3.— C. 464.)
G1. *Gonzales J. J., Wergeland H.* // K. Nor. Vidensk. Selsk. Skr.— 1973.— No. 4.
K1. *Klein M.* // Hist. St. Phys. Sci.— 1970.— Vol. 2.— P. 1.
L1. *Lorentz H. A.* Les Théories Statistiques en Thermodynamique.— Leipzig: Teubner, 1916.— P. 59.
L2. *Lewis G. N.* // Nature.— 1926.— Vol. 118.— P. 874.
M1. *Marcus R. A.* // Ann. N. Y. Acad. Sci.— 1980.— Vol. 357.— P. 169.
O1. *Ornstein L. S., Zernike F.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1919.— Vol. 28.— P. 280.
P1. *Pauli W.* Collected Scientific Papers/R. Kronig, V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Intersci., 1964.— Vol. 1.— P. 630.
P2. *Pais A.* // Rev. Mod. Phys.— 1977.— Vol. 49.— P. 925.
P3. *Pauli W.* // Z. Phys.— 1923.— Bd 18.— S. 272.
R1. *Rutherford E., Soddy F.* // Philos. Mag.— 1902.— Vol. 4.— P. 370, 569.
R2. *Lidem* // Ibid.— 1900.— Vol. 49.— P. 1.
S1. *Stark J.* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 902.
S2. *Stuewer R. H.* The Compton Effect.— N. Y.: Science History, 1975.
S3. *Sommerfeld A.* Atombau und Spektrallinien.— 4th ed.— Braunschweig: Vieweg, 1924.— P. VIII.
W1. *Wigner E. P.* // Ann. Math.— 1939.— Vol. 40.— P. 149.
W2. *Williams B.*, Ed. Compton Scattering.— N. Y.: McGraw-Hill, 1977.

К ст. 22

B1. *Bohr N., Kramers H. A., Slater J. C.* // Philos. Mag.— 1924.— Vol. 47.— P. 785.
B2. *Bohr N.* Letter to A. Einstein, June 24, 1920.
B3. *Idem*. Collected Works/L. Rosenfeld, Ed.— N. Y.: North Holland, 1976.— Vol. 3.— P. 28, 357.
B4. *Bohr N.* // Z. Phys.— 1925.— Bd 34.— S. 142.
B5. *Idem* // Ibid.— 1923.— Bd 13.— S. 117 (esp. sec. 4).
B6. *Bothe W., Geiger H.* // Ibid.— 1924.— Bd 26.— S. 44.
B7. *Iidem* // Naturwiss.— 1925.— Bd 13.— S. 440.
B8. *Iidem* // Z. Phys.— 1925.— Bd 32.— S. 639.
B9. *Bay A., Henri V. P., McLennon F.* // Phys. Rev.— 1955.— Vol. 97.— P. 1710.
B10. *Bohr N.* Letter to R. H. Fowler, April 21, 1925.
C1. *Compton A. M., Simon A. W.* // Phys. Rev.— 1925.— Vol. 26.— P. 889.
E1. *Einstein A.* Postcard to M. Planck, October 23, 1919.
E2. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 259.)
E3. *Idem*. Letter to N. Bohr, May 2, 1920.
E4. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, May 4, 1920.
E5. *Idem*. Letter to N. Bohr, January 11, 1923.
E6. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, March 23, 1922.
E7. *Idem*. Letter to B. Becker, March 20, 1954.
E8. *Ehrenfest P.* Letter to A. Einstein, January 17, 1922.
E9. *Einstein A.* Letter to J. J. Laub, November 4, 1910.
E10. *Idem*. Letter to J. J. Laub, November 7, 1910.
E11. *Idem* // Proc. 1st Solvay Conf./P. Langevin, M. de Broglie, Eds.— Paris: Gauthier-Villars, 1912.— P. 426, 436. (T. 3.— C. 277.)
E12. *Idem*. Letter to K. Joel, November 3, 1924.

E13. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, May 31, 1924.
E14. *Idem*. Undated document in the Einstein archives, obviously written in 1924.
E15. *Idem*. Letter to M. Born, April 29, 1924 // The Born — Einstein Letters/ M. Born, Ed.— N. Y.: Walker, 1971.— P. 82.
H1. *Heisenberg W.* // Naturwiss.— 1929.— Bd 17.— S. 490.
H2. *Idem*. Letter to W. Pauli, June 8, 1924 // [P1].— P. 154.
J1. *Joel K.* Letter to A. Einstein, October 28, 1924.
K1. *Klein M.* // Hist. St. Phys. Sci.— 1970.— Vol. 2.— P. 1.
N1. *Nernst W.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1916.— Bd 18.— S. 83.
P1. *Pauli W.* Letter to N. Bohr, October 2, 1924 // *Pauli W.* Scientific Correspondence/A. Hermann, K. von Meyenn, V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Springer, 1979.— Vol. 1.— P. 163.
P2. *Idem*. Letter to H. A. Kramers, July 27, 1925 // [P1].— P. 232.
P3. *Idem*. Collected Scientific Papers/R. Kronig, V. Weisskopf, Eds.— N. Y.: Interscі., 1964.— Vol. 1.— P. 83—86.
S1. *Schroedinger E.* // Naturwiss.— 1924.— Bd 36.— S. 720.
S2. *Slater J. C.* // Phys. Rev.— 1925.— Vol. 25.— P. 395.
S3. *Idem* // Intern. J. Quantum Chem.— 1967.— Vol. 1s.— P. 1.
S4. *Sommerfeld A.* Atombau und Spektrallinien.— 3rd ed.— Braunschweig: Vieweg, 1922.— S. 311. Рус. пер.: *Зоммерфельд А.* Строение атома и спектры: Пер. с нем.— М.; Л.: ГИТТЛ, 1926—1933.

К с. 23

B1. *Bose S. N.* Letter to A. Einstein, June 4, 1924.
B2. *Blanpied W.* // Amer. J. Phys.— 1972.— Vol. 40.— P. 1212.
B3. *Bose S. N.* // Z. Phys.— 1924.— Bd 26.— S. 178. (Т. 3.— С. 475.)
B4. *Bohr N.* // Philos. Mag.— 1913.— Vol. 26.— P. 1.
D1. *Dirac P. A. M.* // Proc. Roy. Soc.— 1926.— Vol. 112.— P. 661.
D2. *Idem*. History of Twentieth Century Physics.— Varenna Summer School.— N. Y.: Academic Press, 1977.— P. 133—134.
E1. *Einstein A.* Letter to P. Ehrenfest, July 12, 1924.
E2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 132. (Т. 3.— С. 92.)
E3. *Ehrenfest P.* Letter to A. Einstein, April 7, 1926.
E4. *Einstein A.* Letter to P. Ehrenfest, April 12, 1926.
E5. *Idem* // Deutsche Literaturzeitung.— 1924.— P. 1154. (Т. 4.— С. 69.)
E6. *Idem* // Verh. Schw. Naturforsch. Ges.— 1924.— Bd 105.— S. 85. (Т. 2.— С. 154.)
E7. *Idem* // PAW.— 1925.— S. 3. (Т. 3.— С. 489.)
E8. *Idem* // Ibid.— 1924.— S. 261. (Т. 3.— С. 481.)
E9. *Idem* // Z. Phys.— 1925.— Bd 31.— S. 784. (Т. 3.— С. 512.)
E10. *Idem* // PAW.— 1930.— S. 543.
E11. *Idem* // Ibid.— 1925.— S. 18. (Т. 2.— С. 321.)
E12. *Idem*. Letter to H. A. Lorentz, June 17, 1927.
E13. *Idem*. Letter to P. Ehrenfest, November 29, 1924.
F1. *Fermi E.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 36.— S. 902.
H1. *Heisenberg W.* // Ibid.— 1926.— Bd 38.— S. 411.
J1. *Jauch J. M., Rohrlich F.* // The Theory of Photons and Electrons.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1955.
K1. *Klein M.* // Proc. Koninkl. Ned. akad. Wetensch. (Amsterdam).— 1958.— Vol. 62.— P. 41, 51.
K2. *Kahn B., Uhlenbeck G. E.* // Physica.— 1938.— Vol. 4.— P. 399.
K3. *Keesom W. H.* Helium.— N. Y.: Elsevier, 1942.
L1. *London F.* // Nature.— 1938.— Vol. 141.— P. 643.
L2. *Idem* // Phys. Rev.— 1938.— Vol. 54.— P. 1947.
M1. *Mehra J.* // Biogr. Mem. Fell. Roy. Soc.— 1975.— Vol. 21.— P. 117.
P1. *Planck M.* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1900.— Bd 2.— S. 237.
P2. *Pauli W.* // Z. Phys.— 1925.— Bd 31.— S. 625.
P3. *Idem* // Ibid.— 1927.— Bd 41.— S. 81.
S1. *Salaman E.* // Encounter.— 1979.— April.— P. 19.

U1. *Uhlenbeck G. E.* Over Statistische Methoden in de Theorie der Quanta. PhD Thesis.— The Hague: Nyhoff, 1927.
U2. *Idem* // Proc. Einstein Centennial Symp. 1979/H. Woolf, Ed.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.

К гл. 24
B1. *de Broglie L.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1923.— Vol. 177.— P. 507.
B2. *Idem* // Ibid.— P. 548.
B3. *Brillouin L.* // J. Phys. (Paris).— 1921.— Vol. 2.— P. 142.
B4. *Bothe W.* // Z. Phys.— 1923.— Bd 20.— S. 145.
B5. *Bateman H.*/Philos. Mag.— 1923.— Vol. 46.— P. 977.
B6. *de Broglie L.* // Compt. rend. Acad. sci. (Paris).— 1923.— Vol. 177.— P. 630.
B7. *Idem.* Preface to his reedited 1924 PhD Thesis. Recherches sur la Théorie des Quanta.— Paris: Masson, 1963.— P. 4.
B8. *Idem.* Letter to A. Pais, August 9, 1978.
B9. *Idem.* Letter to A. Pais, September 26, 1978.
D1. *Debye P.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1910.— Bd 33.— S. 1427.
E1. *Einstein A.* Letter to H. A. Lorentz, December 16, 1924.
E2. *Idem* // PAW.— 1925.— S. 3. (T. 3.— C. 489.)
H1. *Heisenberg W.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 33.— S. 879.
K1. *Kuhli F.* // Arch. Hist. Ex. Sci.— 1970.— Vol. 7.— P. 26.
K2. *Klein M.* // Nat. Philos.— 1964.— Vol. 3.— P. 1.
O1. *Ornstein L. S., Zernike F.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1919.— Vol. 28.— P. 280.
P1. *Pauli W.* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.— P. 156.
S1. *Schroedinger E.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1926.— Bd 79.— S. 361.
S2. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1926.— Bd 27.— S. 95.
S3. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1926.— Bd 79.— S. 734, footnote on S. 735.
W1. *Wolfke M.* // Phys. Zeitschr.— 1921.— Bd 22.— S. 315.

К гл. 25
B1. *Born M.* // Z. Phys.— 1926.— Bd 37.— S. 863.
B2. *Idem* // Ibid.— 1926.— Bd 38.— S. 803.
B3. *Idem.* Letter to A. Einstein, November 11, 1926.
B4. The Born — Einstein Letters.— N. Y.: Walker, 1971.— P. 130.
B5. *Bohr N.* // Nature.— 1928.— Vol. 121.— P. 580.
B5a. *de Broglie L.* New Perspectives in Physic.— N. Y.: Basic, 1962.— P. 150.
B6. *Bohr N.* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.
B7. *Bothe W., Geiger H.* // Naturwiss.— 1925.— Bd 13.— S. 440; Z. Phys.— 1925.— Bd 32.— S. 639.
B8. *Bargmann V.* // Helv. Phys. Acta.— 1933.— Vol. 7.— P. 57.
B9. *Bohr N.* Dialectica.— 1948.— Vol. 2.— P. 312.
B10. *Idem* // Phys. Rev.— 1935.— Vol. 48.— P. 696. Рус. пер.: *Бор Н.* Избранные труды.— М.: Наука, 1971. С. 180.
C1. *Casimir H. B. G.* Letter to A. Pais, December 31, 1977.
C2. *Clark R. W.* Einstein: The Life and Times.— N. Y.: Avon Books, 1971.— P. 603.
D1. *Dirac P. A. M.* // Proc. Roy. Soc.— 1927.— Vol. A114.— P. 243.
E1. *Einstein A.* Letter to C. Lanczos, March 21, 1942.
E2. *Elsasser W.* // Naturwiss.— 1925.— Bd 13.— S. 711.
E3. *Einstein A.* Letter to R. A. Millikan, September 1, 1925.
E4. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, August 23, 1926.
E5. *Idem.* Letter to P. Ehrenfest, August 28, 1926.
E6. *Idem* // James Clerk Maxwell.— N. Y.: Macmillan, 1931.— P. 66. (T. 4.— C. 136.)
E7. *Idem.* Letter to M. Besso, December 25, 1925 // EB.— P. 215.
E8. *Idem.* Letter to M. Born, March 7, 1926 // [B4].— P. 91.

E9. *Idem*. Letter to E. Schroedinger, April 26, 1926; reprinted in: Letters on Wave Mechanics/M. Klein, Ed.— N. Y.: Philosophical Library, 1967.
E10. *Idem*. Letter to M. Besso, May 1, 1926 // EB.— P. 224.
E11. *Idem*. Letter to M. Born, December 4, 1926 // [B4].— P. 90.
E12. *Idem* // Z. Angew. Chemie.— 1927.— Bd 40.— S. 546. (T. 3.— C. 525.)
E13. *Idem* // Proc. of the 5th Solvay Conf.— Paris: Gauthier-Villars, 1928. (T. 3.— C. 528.)
E14. *Idem*. Letter to H. A. Lorentz, November 21, 1927.
E15. *Einstein A., Tolman R., Podolsky B.* // Phys. Rev.— 1931.— Vol. 37.— P. 780. (T. 3.— C. 531.)
E16. *Einstein A.* // Z. Angew. Chemie.— 1932.— Bd 45.— S. 23. (T. 3.— C. 534.)
E17. *Idem*. On the Methods of Theoretical Physics.— N. Y.: Oxford Univ. Press, 1933; reprinted in: Philos. Sci.— 1934.— Vol. 1.— P. 162. (T. 4.— C. 181.)
E18. *Idem* Travel diary, December 6, 1931.
E19. *Idem*. Letter to A. Flexner, June 8, 1932.
E20. *Idem*. Origins of the General Theory of Relativity, Glasgow Univ., Publ. No. 30, 1933. (T. 2.— C. 403.)
E21. *Einstein A., Mayer W.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1933.— Vol. 36.— P. 497. (T. 3.— C. 568.)
E22. *Idem* // Ibid.— P. 615. (T. 3.— C. 591.)
E23. *Idem* // PAW.— 1932.— S. 522. (T. 3.— C. 535.)
E24. *Einstein A.* Letter to Queen Elizabeth of Belgium, November 20, 1933.
E25. *Idem*. Letter to Queen Elizabeth of Belgium, February 16, 1935.
E26. *Idem*. Letter to F. D. Roosevelt, August 2, 1939; March 7, 1940 // [N3].— P. 294, 299.
E27. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* // Phys. Rev.— 1935.— Vol. 47.— P. 777 (T. 3.— C. 604.)
E28. *Einstein A.* Dialectica.— 1948.— Vol. 2.— P. 320. (T. 3.— C. 612.)
E29. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 294.)
E30. *Idem* // Scientific Papers Presented to Max Born.— N. Y.: Hafner, 1951.— P. 33. (T. 3.— C. 617.)
E31. *Idem* // Louis de Broglie, Physicien et Penseur.— Paris: Michel, 1953.— P. 5 (T. 3.— C. 623.)
E32. *Idem*. Letter to E. Schroedinger, December 22, 1950.
E33. *Idem*. Letter to M. Born, May 12, 1952.
F1. *Flexner A.* I Remember.— N. Y.: Simon and Schuster, 1940.
F2. *Idem* // New York Times.— 1955.— April 19.
F3. *Idem*. Letter to A. Einstein, October 13, 1933.
G1. *Goudsmit S.* Letter to A. Pais, January 16, 1978.
H1. *Heisenberg W.* Postcard to W. Pauli, June 29, 1925 // Pauli Scientific Correspondence.— N. Y.: Springer, 1979.— Vol. 1.— P. 229.
H2. *Idem* // Z. Phys.— 1926.— Bd 33.— S. 879.
H3. *Idem*. Der Teil und das Ganze.— Munich: Piper, 1969.— S. 90—100.
H4. *Idem*. Letter to A. Einstein, November 30, 1925.
H5. *Idem* // Niels Bohr and the Development of Physics/W. Pauli, Ed.— N. Y.: McGraw-Hill, 1955.— P. 12.
H6. *Idem* // Z. Phys.— 1927.— Bd 43.— S. 172.
H7. *Idem*. Letter to A. Einstein, June 10, 1927.
H8. *Idem*. Letter to A. Einstein, May 19, 1927.
I1. The Institute for Advanced Study, excerpt from minutes, October 10, 1932.
J1. *Jammer M.* The Philosophy of Quantum Mechanics.— N. Y.: Wiley, 1974.
K1. *Kirsten C., Treder H. J.* Einstein in Berlin.— Berlin: Akad. Verlag, 1979.
K2. *Klein F.* Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19 Jahrhundert.— N. Y.: Springer, 1979.— Bd 2.— Chap. 2.— Sec. 2.
L1. *Lerner A. B.* Einstein and Newton.— Minneapolis: Lerner, 1973.— P. 212—215.
M1. *Mehra J.* // Biogr. Mem. Fell. Roy. Soc.— 1975.— Vol. 21.— P. 117.
N1. New York Times.— 1933.— March 20.
N2. Ibid.— 1933.— August 22.
N3. *Nathan O., Norden M.* Einstein on Peace.— N. Y.: Schocken, 1968.

N4. New York Times.— 1973.— July 27.
N5. Ibid.— 1938.— September 16.
P1. *Pais A.* // Niels Bohr.— Amsterdam: North Holland, 1967.— P. 215.
P2. *Pipkin F. M.* // Adv. At. Mol. Phys.— 1978.— Vol. 14.— P. 281.
R1. *Rosenfeld L.* // Proc. of the 14th Solvay Conf.— N. Y.: Intersci., 1968.
S1. *Scott W. T.* Erwin Schroedinger.— Amherst: Univ. of Mass. Press, 1967.
S2. *Stimson H. L.* On Active Service in Peace and War.— N. Y.: Harper, 1947.
V1. *Vallentin A.* The Drama of Albert Einstein.— N. Y.: Doubleday, 1954.— P. 278.
W1. *Wigner E. P.* // Proc. Einstein Centennial Conf. at Princeton.— Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.

К ст. 26

B1. *Born M.* Letter to A. Einstein, October 10, 1944.
B2. *Idem*, Ed. The Born — Einstein Letters.— N. Y.: Walker, 1971.— Y. 88.
E1. *Einstein A.* Smithsonian Inst. Report for 1927.— P. 201; Naturwiss.— 1927.— Bd 15.— S. 273. (T. 4.— C. 82.)
E2. *Idem* // J. Franklin Inst.— 1936.— Vol. 221.— P 313. (T. 4.— C. 200.)
E3. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949. (T. 4.— C. 259.)
E4. *Idem.* On the Method of Theoretical Physics.— N. Y.: Oxford Univ. Press, 1933; reprinted in: Philos. Sci.— 1934.— Vol. 1.— P. 162. (T. 4.— C. 181.)
E5. *Idem.* Letter to M. Born, September 15, 1950.
E6. *Idem.* Letter to M. Besso, August 8, 1949 // EB.— P. 407.
E7. *Idem.* Letter to M. Born, April 12, 1949.
E8. *Idem.* Letter to M. Born, March 18, 1948.
E9. *Idem.* Letter to M. Besso, July 24, 1949 // EB.— P. 402.
E10. *Idem* Letter to E. Schroedinger, August 9, 1939.
E11. *Idem.* Letter to N. Bohr, April 4, 1949.
E12. *Idem.* Letter to M. Born, March 18, 1948.
E13. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1905.— Bd 17.— S. 891. (T. 1.— C. 7.)
E14. *Idem* // Ibid.— Bd 18.— S. 639 (T. 1.— C. 36.)
E15. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 817. (T. 3.— C. 181.)
E16. *Idem* // Ibid.— 1917.— Bd 18.— S. 121
E17. *Idem.* Letter to M. Born, March 22, 1934.
E18. *Idem.* Letter to A. Sommerfeld, December 14, 1946.
E19. *Idem* // James Clerk Maxwell.— N. Y.: Macmillan, 1931.— P. 66. (T 4.— C. 136.)
E20. *Idem* // PAW.— 1923 — S. 359. (T. 3 — C. 456.)
E21. *Idem.* Letter to M. Born, March 3, 1920.
E22. *Idem.* Letter to M. Besso, January 5, 1924 // EB.— P. 197.
E23. *Idem* // Forschungen und Fortschritte.— 1929.— Bd 5.— S. 248. (T. 4.— C. 109.)
E24. *Idem.* Letter to M. Besso, July 28, 1925 // EB.— P. 209.
E25. *Idem* Letter to M. Besso, August 1942 // EB.— P. 366.
E26. *Idem.* Letter to M. Besso, August 16, 1949 // EB.— P. 409.
E27. *Idem.* Letter to L. de Broglie, February 8, 1954.
E28. *Einstein A., Grommer J.* // PAW.— 1927.— S. 2. (E. 2.— C. 198.)
E29 *Einstein A* // Ibid.— S. 235. (T 2.— C. 211.)
E30. *Idem*/Science.— 1930.— Vol. 71.— P. 608.
E31. *Idem* // Ibid.— 1931.— Vol. 74.— P. 438. (T 2.— C. 347.)
E32. *Einstein A., Rosen N.* // Phys. Rev.— 1935.— Vol. 48.— P. 73. (T. 2.— C. 424.)
E33. *Einstein A.* // Physica.— 1925 — Vol. 5.— P. 330. (T. 2.— C. 167.)
E34. *Idem* // Science.— 1940.— Vol. 91.— P 487. (T. 4.— C. 229.)
E35. *Idem.* Letter to M. Born, undated, probably 1949.
E36. *Idem.* Letter to L. Infeld, March 6. 1941.
E37. *Idem* Letter to M. Besso, August 10, 1954 // EB.— P. 525.
E38. *Idem* // Louis de Broglie, Physicien et Penseur.— Paris: Michel, 1953. (T. 3.— C. 623.)

E39. *Idem*. Introduction to the book: *Kayser R.* Spinoza, Portrait of a Spiritual Hero.— N. Y.: Philosophical Library, 1946.— P. XI. (T. 4.— C. 253.)
E40. *Idem* // Helle Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956. (T. 4.— C. 350.)
H1. *Heisenberg W.* Letter to A. Einstein, June 10, 1927.
P1. *Pauli W.* // Phys. Zeitschr.— 1919.— Bd 20.— S. 457.
S1. *Shankland R. S.* // Amer. J. Phys.— 1963.— Vol. 31.— P. 47.
T1. *Thirring W.* Letter to A. Pais, November 29, 1977.
U1. *Uhlenbeck G. E.* // Phys. Today.— 1976.— Vol. 29(6).— P. 43.

К ст. 27

D1. *Dukas H.* Letter to C. Seelig // Bibl. ETH, Zürich, HS 304 : 133.
D2. *Idem*. Letter to A. Pais, April 30, 1955.
D3. *Idem*. Letter to C. Seelig, May 8, 1955 // Bibl. ETH, Zürich, HS 304 : 90.
D4. *Dean G. K.* // New York Times.— 1955.— April 19.
E1. *Einstein A.* Letter to M. Besso, April 21, 1946 // EB.— P. 376.
E2. *Idem* // Dialectica.— 1948.— Vol. 2.— P. 320. (T. 3.— C. 612.)
E3. *Idem* // Albert Einstein: Philosopher-Scientist/P. Schilpp, Ed.— N. Y.: Tudor, 1949.— P. 2. (T. 4.— C. 259.)
E4. *Idem* // New York Times.— 1945.— December 11.
E5. *Idem*. Co-signing a statement published in: New York Times.— 1945.— October 10.
E6. *Idem* // New York Times.— 1945.— September 15.
E7. *Idem* // Impact.— 1950.— Vol. 1.— P. 104.
E8. *Idem*. Letter to G. Nellhaus, March 20, 1951.
E9. *Idem*. Letter to W. Frauenglass // New York Times.— 1953.— June 12.
E10. *Idem*. Letter to A. Sommerfeld, December 14, 1946.
E11. *Idem*. Letter to K. Blumenfeld, March 25, 1955.
E12. *Idem* // Schweizerische Hochschulzeitung.— 1955.— Bd 28, special issue: reproduced with a small deletion in: Helle Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956.— (T. 4.— C. 350.)
E13. *Idem*. Letter to V. Besso, March 21, 1955 // EB.— P. 537.
E14. *Einstein H. A.* Letter to C. Seelig, April 18, 1955 // Bibl. ETH, Zürich, HS 304 : 566.
M1. *Mitrany D.* // Jewish Observer and Middle East Review.— 1955.— April 22.
N1. *Nathan O., Norden M.* Einstein on Peace.— N. Y.: Schocken, 1968.
N2. *Nissen R.* Letter to C. Seelig, June 29, 1955 // Bibl. ETH, Zürich, HS 304 : 906/911.
S1. *Seelig C.* // [E12].— S. 86.
W1. *Wade N.* // Science.— 1981.— Vol. 213.— P. 521.

К ст. 28

B1. *Burstin C.* Letter to A. Einstein, April 20, 1933.
C1. *Chinitz N.* Letter to A. Einstein, March 29, 1953.
D1. *Duschek A., Mayer W.* Lehrbuch der Differentialgeometrie.— Leipzig: Teubner, 1930.— Bd 1, 2.
D2. *Denman H. H.* // Phys. Today.— 1967.— March.— P. 141.
D3. *Dukas H., Hoffmann B.* Albert Einstein, the Human Side: New Glimpses From His Archives.— Princeton: Princeton Univ. Press, 1979.
E1. *Einstein A., Laub J. J.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1908.— Bd 26.— S. 532; Correction: Bd 27.— S. 232, Bd 28.— S. 445. (T. 1.— C. 115, 123.)
E2. *Idem* // Ibid.— 1908.— Bd 26.— S. 541. (T. 1.— C. 126.)
E3. *Einstein A.* // Ibid.— 1907.— Bd 22.— S. 569. (T. 3.— C. 145.)
E4. *Idem*. Letter to C. Habicht, December 24, 1907.
E5. *Idem* // Phys. Zeitschr.— 1908.— Bd 9.— S. 216. (T. 3.— C. 152.)
E6. *Idem*. Letter to J. Stark, December 14, 1908; reprinted in: *Hermann A.* // Sudhoff's Archiv.— 1966.— Bd 50.— S. 267.
E7. *Idem*. Letter to M. Besso, December 12, 1911 // EB.— P. 40.
E8. *Idem*. Letter to M. Besso, February 4, 1912 // EB.— P. 45.
E9. *Idem*. Letter to C. Habicht, August 15, 1948.
E10. *Einstein A., Hopf L.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1910.— Bd 33.— S. 1096. (T. 3.— C. 196.)

E11. *Iidem* // Ibid.— P. 1105. (T. 3.— C. 205.)
E12. *Einstein A.* Letter to F. R. Schwarz, February 7, 1946.
E13. *Einstein A., Stern O.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1913.— Bd 40.— S. 551. (T. 3 — C. 314.)
E14. *Einstein A.* // Helle Zeit, dunkle Zeit/C. Seelig, Ed.— Zürich: Europa Verlag, 1956. (T. 4.— C. 350.)
E15. *Einstein A., Fokker A. D.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1914.— Bd 44.— S. 321. (T. 1.— C. 305.)
E16. *Einstein A.* Statement prepared for N. Chinitz, April 7, 1953.
E17. *Idem* // PAW.— 1917.— S. 146. (T. 1.— C. 601.)
E18. *Einstein A., Grommer J.* // Scripta Jerusalem Univ.— 1923.— Vol. 1, No. 7. (T. 2.— C. 130.)
E19. *Einstein A.* // PAW.— 1923.— S. 359. (T. 3.— C. 456.)
E20. *Idem* // Ibid.— 1925.— S. 419. (T. 2.— C. 171.)
E21. *Einstein A., Grommer J.* // Ibid.— 1927.— S. 2. (T. 2 — C. 198.)
E22. *Einstein A.* // Ibid.— 1929.— S. 7. (T. 2.— C 252.)
E23. *Einstein A., Ehrenfest P.* // Z. Phys.— 1922.— Bd 11.— S. 31. (T. 3.— C. 442.)
E24. *Iidem.* // Z. Phys.— 1923.— Bd 19.— S. 301. (T. 3.— C. 450.)
E25. *Einstein A.* Out of My Later Years.— 3rd ed.— Secaucus, N. Y.: Citadel Press, 1977.— P. 236. (T. 4.— C. 190.)
E26. *Einstein A., Mühsam H.* // Deutsch. Medizin Wochenschr.— 1923.— S. 1012. (T. 3.— C. 447.)
E27. *Einstein A.* Letter to H. Mühsam, undated, summer 1942; quoted in Se.— P. 412.
E28. *Idem.* Letter to L. Szilard, September 12, 1927.
E29. *Idem.* Letter to M. Jäger, April 13, 1934.
E30. *Idem.* Letter to E. Madelung, September 29, 1928.
E31. *Idem* // PAW.— 1929.— S. 156. (T. 2.— C. 270.)
E32. E33. *Idem.* Letter to H. Müntz, July 1928.
E34. *Einstein A., Mayer W.* // PAW.— 1930.— S. 110. (T. 2.— C. 329.)
E35. *Einstein A.* Letter to L. Bierberbach, June 19, 1930.
E36. *Einstein A., Mayer W.* // PAW.— 1931.— S. 541. (T. 2.— C. 366.)
E37. *Iidem* // Ibid.— 1932.— S. 130. (T. 2.— C. 387.)
E38. *Iidem* // Ibid.— S. 522. (T. 3.— C. 535.)
E39. *Einstein A.* Letter to A. Flexner, July 30, 1932.
E40. *Einstein A., Mayer W.* // Proc. Koninkl. akad. (Amsterdam).— 1933.— Vol. 36.— P. 497. (T. 3.— C. 568.)
E41. *Iidem* // Ibid.— P. 615. (T. 3.— C. 591.)
E42. *Einstein A.* Letter to A. Flexner, March 24, 1933.
E43. *Idem.* Letter to A. Flexner, April 13, 1933.
E44. *Idem.* Letter to A. Flexner, August 4, 1933.
E45. *Einstein A., Mayer W.* // Ann. Math.— 1934.— Vol. 35.— P. 104. (T. 3.— C. 586.)
E46. *Ehrenfest P., Tolman R. C., Podolsky B.* // Phys. Rev.— 1931.— Vol. 37.— P. 602.
E47. *Einstein A., Tolman R. C., Podolsky B.* // Ibid.— P. 780. (T. 3.— C. 531.)
R48. *Einstein A., de Sitter W.* // Proc. Nat. Acad. Sci.— 1932.— Vol. 18.— P. 213. (T. 2.— C. 396.)
E49. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* // Phys. Rev.— 1935.— Vol. 47.— P. 777. (T. 3.— C. 604.)
E50. *Einstein A., Rosen N.* // Ibid.— 1935.— Vol. 48.— P. 73. (T. 2.— C. 424.)
E51. *Iidem* // Ibid.— 1936.— Vol. 49.— P. 404. (T. 2.— C. 434.)
E52. *Iidem* // J. Franklin Inst.— 1937.— Vol. 223.— P. 43. (T. 2.— C. 438.)
E53. *Einstein A.* Letter to J. T. Tate, July 27, 1936.
E54. *Idem* // Phys. Rev.— 1953.— Vol. 89.— P. 321.
E55. *Idem.* Letter to V. Molotov, March 23, 1936.
E56. *Idem.* Letter to V. Molotov, July 4, 1936.
E57 *Idem* // *Infeld L.* The World of Modern Science.— Lond.: V. Gollancz, 1934.— P. 5. (T. 4.— C. 194.)
E58. *Einstein A., Infeld L., Hoffmann B.* // Ann. Math.— 1938. Vol. 39.— P. 65. (T. 2.— C. 450.)

E59. *Einstein A., Infeld L.* // Ibid.— 1940.— Vol. 41.— P. 455. (T. 2 — C. 532.)
E60. *Iidem* // Canad. J. Math.— 1941.— Vol. 3.— P. 209. (T. 2.— C. 674.)
E61. *Iidem.* The Evolution of Physics.— Cambridge: Cambridge Univ. Press; Amsterdam: Sythoff's; N. Y.: Simon and Schuster, 1938. (T. 4.— C. 357.)
E62. *Einstein A.* Letter to L. Infeld, undated, probably April 1941.
E63. *Einstein A., Bergmann P.* // Ann. Math.— 1938.— Vol. 39.— P. 65. (T. 2.— C. 492.)
E64. *Einstein A., Bargmann V., Bergmann P.* // Th. von Kármán Anniversary Volume.— Pasadena: California Inst. of Technology, 1941.— P. 212. (T. 2.— C. 543.)
E65. *Einstein A.* // *Bergmann P.* Introduction to the Theory of Relativity.— N. Y.: Prentice-Hall, 1942.— P. v.
E66. *Einstein A., Bargmann V.* // Ann. Math.— 1944.— Vol. 45.— P. 1. (T. 2.— C. 568.)
E67. *Einstein A.* // Ibid.— P. 15. (T. 2.— C. 586.)
E68. *Idem* // Naturwiss.— 1922.— Bd 10.— S. 184.— (T. 4 — C. 47.)
E69. *Einstein A., Pauli W.* // Ann. Math.— 1943.— Vol. 44.— P. 131.— (T. 2.— C. 560.)
E70. *Einstein A.* // Rev. Univ. Nac. de Tucuman.— 1941.— Vol. 2.— P. 11. (T. 2.— C. 555.)
E71. *Enz C. P.* // *Mehra J.* The Physicists' Conception of Nature.— Boston: Reidel, 1973.— P. 766.
E72. *Einstein A., Straus E.* // Rev. Mod. Phys.— 1945.— Vol. 17.— P. 120; Correction in 1946.— Vol. 18.— P. 148. (T. 2 — C. 623, 632.)
E73. *Iidem* // Ann. Math.— 1946.— Vol. 47.— P. 731. (T. 2.— C. 636.)
E74. *Einstein A.* Letter to J. R. Oppenheimer, March 31, 1955.
E75. *Einstein A., Kaufman B.* // Ann. Math.— 1954.— Vol. 59.— P. 230. (T. 2.— C. 818.)
E76. *Iidem* // Ibid.— 1955.— Vol. 62.— P. 128. (T. 2.— C. 835.)
F1. *Fuchs F., Hopf L.* Aerodynamik.— Berlin: R. C. Schmidt, 1922.
F2. *Frank P.* Einstein, His Life and Times.— N. Y.: A. Knopf, 1953.— P. 82.
F3. *Fokker A. D.* // Phys. Zeitschr.— 1914.— Bd 15.— S. 96.
F4. *Feld B. T., Weiss Szilard G.*, Eds. The Collected Works of Leo Szilard.— Cambridge, Mass.: MIT Press, 1972.— Vol. 1.— P. 527.
F5. *Flückiger M.* Einstein in Bern.— Bern: Paul Houpt, 1974.— P. 148.
G1. *Grommer J.* Letter to A. Einstein, undated, 1929.
H1. *Habicht M.* // Verh. Schw. Naturforsch. Ges.— 1959.— S. 405.
H2. *Habicht C., Habicht P.* // Phys. Zeitschr.— 1910.— Bd 11.— S. 532.
H3. *Hopf L.* Handbuch der Physik.— Berlin: Springer, 1927.— Bd 7.— S. 91.
H4. *Hoffmann B.* Albert Einstein, Creator and Rebel.— N. Y.: Viking Press, 1972. Рус. пер.: *Хофман Б.* Альберт Эйнштейн, творец и бунтарь: Пер. с англ.— М.: Прогресс, 1983.
I1. *Infeld L.* Quest.— N. Y.: Doubleday, 1941.— P. 261—270.
K1. *Kollros L.* // Verh. Schw. Naturforsch. Ges.— 1937.— Bd 118.— S. 325.
K2. *Kirsten C., Treder H. J.* A. Einstein in Berlin.— Berlin, Akad. Verlag, 1979.
K3. *Kemeny J. G.* Letter to A. Pais, November 27, 1979.
K4. *Idem* // Einstein, a Centenary Volume/A. P. French, Ed.— Lond.: Heinemann, 1979.— P. 34.
K5. *Kaufman B.* // Helv. Phys. Acta Suppl.— 1956.— Vol. IV.— P. 227.
L1. *Laub J. J.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1907.— Bd 23.— S. 738.
L2. *Idem.* Letter to A. Einstein, February 2, 1908.
L3. *Idem* // Jahrb. Rad. Elektr.— 1910.— Bd 7.— S. 405.
L4. *Lanczos C.* Letter to A. Einstein, October, 6, 1928.
L5. *Idem* // Erg. Ex. Naturwiss.— 1931.— Bd 10.— S. 97.
L6. *Idem.* Albert Einstein and the Cosmic World Order.— N. Y.: Intersci., 1965.
L7. *Idem.* Space Through the Ages.— N. Y.: Academic Press, 1970.
L8. *Idem.* The Einstein Decade, 1905—1915.— N. Y.: Academic Press, 1974.
M1. *Muhsam M.* Letter to C. Seelig, July 10, 1955.
M2. *Idem.* Letter to C. Seelig, May 3, 1956.
M3. *Idem.* Letter to C. Seelig, September 10, 1959.
M4. *Melcher H.* Spektrum, Monatszeit für Wiss. Akad. der Wiss. DDR.— 1978.— September.— S. 23.

M5. *Idem* // Der Neuerer.— 1979.— May/June.— S. 202.
M6. *Müntz H.* Letter to A. Einstein, March 14, 1938.
M7. *Idem.* Letter to A. Einstein, November 25, 1937.
M8. *von Mises R.* Letter to A. Einstein, December 17, 1929.
N1. *Nohel Y.* Letter to A. Pais, January 1, 1980.
P1. *Pyenson L.* // Hist. St. Phys. Sci.— 1976.— Vol. 7.— P. 83.
P2. *Pauli W.* // Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften.— Leipzig: Teubner, 1921 — Bd 5.— Part 2.— S. 539. English transl.: Theory of Relativity.— Lond.: Pergamon Press, 1958. Рус. пер.: *Паули В.* Теория относительности: Пер. с нем.— М.: Наука, 1983.
R1. *Ritz W., Einstein A.* // Phys. Zeitschr.— 1909.— Bd 10.— S. 323. (Т. 3.— С. 180.)
R2. *Russenberger M.* // Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen.— 1949.— Bd 23.— S. 304.
R3. *Rosenblueth.* Letter to the Univ. Committee, c/o Zionist Executive, Lond., March 25, 1925.
S1. Se.— S. 181.
S2. *Saxer W.* // Viertelj. Schrift Naturforsch. Ges. (Zürich).— 1936.— Bd 81.— S. 322.
S3. *Szilard L.* Letter to A. Einstein, October 12, 1929.
T1. *Tolman R. C.* The Theory of the Relativity of Motion.— Berkely: Univ. of California Press, 1917.
T2. *Idem.* Relativity, Thermodynamics and Cosmology.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1934. Рус. пер.: *Толмен Р.* Относительность, термодинамика и космология: Пер. с англ.— М.: Наука, 1974.
T3. *Tate J. T.* Letter to A. Einstein, July 30, 1936.
W1. *Woolf H.*, Ed. Some Strangeness in the Proportion.— Reading, Mass.; Addison-Wesley, 1979.— P. 459. Рус. пер.: Эйнштейновский сборник 1982—1983.— М.: Наука, 1986.
W2. *Wigner E. P.* // Biogr. Mem. Nat. Acad. Sci.— 1964.— Vol. 40.— P. 337.

К гл. 29

A1. *Aurivillius C.* Letter to A. Einstein, November 10, 1922.
A2. *Arrhenius E.* Letter to A. Einstein, March 17, 1923.
B1. *Bohr N.* Letter to SAS [*]), January 30, 1920.
B2. *Brillouin M.* Letter to SAS, November 12, 1921.
B3. *Bergson H. L.* Oeuvres/A. Robinet, Ed.— Paris: Presses Univ. de France, 1970.
E1. *Einstein Ilse.* Letter to Prof. Sederholm, April 6, 1923.
E2. *Einstein A.* Letter to S. Arrheinius, March 23, 1923.
E3. *Idem.* Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie.— Stockholm: Imprimerie Royale, 1923. (Т. 2.— С. 120.)
E4. *Idem* // Verh. Deutsch. Phys. Ges.— 1917.— Bd 20.— S. 261.
E5. *Eddington A. S.* Letter to SAS, January 1, 1921.
G1. *Gullstrand A.* // Ark. Mat. Astr. Fys.— 1921.— Vol. 16, No. 8.
G2. *Idem* // Ibid.— 1922.— Vol. 17, No. 3.
H1. *Hedvall J. A.* Letter to H. Dukas, November 19, 1971.
H2. *Herzberger M.* // Opt. Acta.— 1960.— Vol. 7.— P. 237.
K1. *Kirsten C., Treder H. J.* Albert Einstein in Berlin.— Berlin: Akad. Verlag, 1979.— Bd 1.— S. 113—118.
K2. *Kretschmann E.* // Ark. Mat. Astr. Fys.— 1922.— Vol. 17, No. 2.
K3. *Idem* // Ibid.— 1923.— Vol. 17, No. 25.
L1. *von Laue M.* Letter to A. Einstein, September 18, 1922.
L2. Les Prix Nobel.— Stockholm: Imprimerie Royale, 1923.— P. 101—102.
L3. *Lorentz H. A.* Letter to P. Ehrenfest, September 22, 1919.
N1. *Nagel B.* Letter to A. Pais, May 7, 1981.
O1. *Ostwald W.* Letter to SAS, October 2, 1909.
O2. *Idem.* Letter to SAS, December 21, 1911.

[*]) SAS — Royal Swedish Academy of Science.

O3. *Idem.* Letter to SAS, December 30, 1912.
P1. *Pringsheim E.* Letter to SAS, January 12, 1912.
P2. *Planck M.* Letter to SAS, January 19, 1919.
W1. *Wien W.* Letter to SAS, early January, 1912.
W2. *Weiss P.* Letter to SAS, January 21, 1917.
W3. *Witten L.*, Ed. Gravitation.— N. Y.: Wiley, 1962.

К ст. 30

B1. *Broch H.* The Death of Virgil.— N. Y.: Grosset and Dunlop, 1965.
E1. *Einstein A., Freud S.* Why War? — Paris: Inst. of Intellectual Cooperation, League of Nations, 1933.
E2. *Einstein A.* Letter to A. Bachrach, July 25, 1949.
F1. *Förster F. W.* Erlebte Weltgeschichte.— Nürnberg: Glock und Lutz, 1953.
G1. *Grossmann K. R.* Ossietzky.— Munich: Kindler Verlag, 1963.
J1. *Jones E.* The Life and Work of Sigmund Freud.— N. Y.: Basic Books, 1957.— Vol. 3.
N1. *Nathan O., Norden H.* Einstein on Peace.— N. Y.: Simon and Schuster, 1960.
N2. New York Times.— 1966.— January 22.
P1. *Planck M.* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 553; reprinted in: *Planck M.* Physikalische Abhandlungen und Vorträge/M. von Laue, Ed.— Braunschweig: Vieweg, 1958.— Bd 1.— S. 717.
P2. *Idem* // Ann. Phys. (Leipzig).— 1901.— Bd 4.— S. 564; see [P1].— Bd 1.— S. 728.

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ ЭЙНШТЕЙНА

1876 г. — 8 августа в Гапштатте сочетаются браком Герман Эйнштейн (род. в 1847 г.) и Паулина Кох (род. в 1858 г.).

1879 г. — 14 марта в 11 ч 30 мин по их месту жительства (Ульм, Банхофштрассе, 135) родился первый их ребенок, Альберт.

1880 г. — 21 июня семья Эйнштейнов регистрируется в качестве жителей Мюнхена.

1881 г. — 18 ноября родилась сестра Альберта Мария (Майя).

~1884 г.[1]) — первое чудо: Эйнштейн очарован карманным компасом. Он начинает заниматься с частным учителем.

~1885 г. — Эйнштейн начинает учиться игре на скрипке (и продолжает занятия до 13 лет).

~1886 г. — поступление в школу в Мюнхене. Чтобы удовлетворить формальным требованиям о религиозном образовании, дома проводится обучение элементам иудаизма.

1888 г. — поступление в гимназию Луитпольда [2]).

1889 г. — первая встреча с Максом Талмудом (впоследствии взявшим имя Талми), в то время 21-летним студентом-медиком, познакомившим Эйнштейна с «Популярными книгами по физике» Бернштейна, «Силой и материей» Бюхнера, «Критикой чистого разума» Канта и другими книгами. Талмуд регулярно бывает в доме Эйнштейнов до 1894 г. В это время они с Альбертом обсуждают научные и философские вопросы.

~1890 г. — религиозный период, продолжавшийся около года.

~1891 г. — второе чудо: знакомство со «священной книгой по геометрии»

~1891—1895 гг. — знакомство с элементами высшей математики, включая дифференциальное и интегральное исчисление.

1894 г. — семейство переезжает в Италию, сначала в Милан, затем в Павию, а потом обратно в Милан. Альберт остается в Мюнхене для окончания гимназии.

1895 г.[3]) — Альберт посылает своему дяде Цезарю Коху, живущему в Бельгии, эссе «К рассмотрению состояния эфира в магнитном поле».

1895 г. — бегство из гимназии Луитпольда до окончания обучения. Весной Альберт приезжает к семье в Павию;

— осенью он не поступает в Цюрихский политехникум, хотя отлично сдает экзамены по физике и математике;

— 28 октября 1895 г.— начало осени 1896 г.: обучение в кантональной школе Аарау. Альберт живет в доме «папы» Поста

---

[1]) Символ ~ означает, что точно известен лишь год события.

[2]) Эта гимназия, находившаяся по адресу Мюллерштрассе, 33, была разрушена во время второй мировой войны. Позднее она была построена заново в другом месте и названа гимназией Альберта Эйнштейна.

[3]) Эту дату привел Эйнштейн в 1950 г.

Винтелера, одного из своих учителей. В этот период он пишет на французском языке сочинение «Мои планы на будущее».

1896 г. — 28 января: уплатив три марки, Эйнштейн получает свидетельство о том, что он больше не является гражданином Германии (точнее, Вюртемберга). В течение следующих пяти лет он не имел гражданства;

— осень: получение в Аарау диплома, позволяющего быть зачисленным в политехникум; 29 октября он поселяется в Цюрихе. Среди его сокурсников — Марсель Гроссман и Милева Марич (или Марити). Диплом политехникума давал право преподавания в средней школе.

~1897 г. — встреча в Цюрихе с Микелем Анжело Бессо, которая положила начало дружбе, длившейся всю жизнь.

1899 г. — 19 октября Эйнштейн обращается с официальным прошением о предоставлении ему швейцарского гражданства.

1900 г. — 27 июля: экзаменационный совет ходатайствует о выдаче дипломов среди прочих Гроссману и Эйнштейну; 28 июля ходатайство удовлетворяется;

— осень: безуспешные попытки получить должность ассистента в политехникуме;

— 13 декабря: Эйнштейн посылает из Цюриха в журнал «Annalen der Physik» свою первую работу.

1901 г. — 21 февраля: получение швейцарского гражданства; 13 марта Эйнштейна признают негодным к несению военной службы в швейцарской армии из-за плоскостопия и варикозного расширения вен;

— март — апрель: безуспешные попытки получить работу у Оствальда в Лейпциге и у Камерлинг-Оннеса в Лейдене;

— 17 мая: Эйнштейн извещает о предстоящем отъезде из Цюриха;

— 19 мая — 15 июля: временная работа в качестве преподавателя математики в технической школе Винтертура, где Эйнштейн оставался до 14 октября;

— сентябрь — январь 1902 г.: временная работа в качестве учителя в Шафхаузене;

— 18 декабря: направление заявления с просьбой принять в штат Бернского патентного бюро.

1902 г. — 21 февраля Эйнштейн переезжает в Берн. Вначале он живет только на средства, посылавшиеся родителями, и на доход от частных уроков математики и физики;

— 16 июня: Федеральный совет Швейцарии назначает Эйнштейна экспертом третьего класса Бернского патентного бюро (с испытательным сроком) с окладом 3500 франков в год. Он приступает к работе 23 июня;

— 10 октября: смерть отца в Милане.

1903 г. — 6 января: женитьба на Милеве Марич;

— Конрад Габихт, Морис Соловин и Эйнштейн основывают «Академию Олимпия»;

— 5 декабря Эйнштейн выступает на заседании Общества естествоиспытателей Берна с докладом «Теория электромагнитных волн».

1904 г. — 14 мая родился первый сын, Ганс Альберт (ум. в 1973 г. в Беркли, Калифорния);

— 16 сентября: по окончании испытательного срока Эйнштейн получает постоянный контракт.

1905 г. — 17 марта: окончание работы над статьей, в которой излагается гипотеза световых квантов;

— 30 апреля: завершение диссертации на тему «Новое определение размеров молекул». Диссертация, напечатанная в Берне и представленная в Цюрихский университет, была принята в июле. Она имела посвящение: «Моему другу доктору М. Гроссману»;

— 11 мая: редакция журнала «Annalen der Physik» получает первую статью о броуновском движении;
— 30 июня: в редакцию поступает первая статья о СТО;
— 27 сентября: в редакцию поступает вторая статья о СТО. В ней приводится соотношение $E = mc^2$;
— 19 декабря: в редакцию поступает вторая статья о броуновском движении.

1906 г. — 1 апреля: Эйнштейн повышен в должности; он становится экспертом второго класса с годовым жалованьем 4500 франков в год;
— ноябрь: окончание работы об удельной теплоемкости твердых тел, самой первой статьи по квантовой теории твердого тела.

1907 г. — «Счастливейшая мысль в моей жизни»: Эйнштейн устанавливает принцип эквивалентности для равноускоренных механических систем. Он распространяет его на электромагнитные явления, дает правильное выражение для красного смещения и отмечает, что из этого принципа следует также искривление световых лучей, проходящих около массивных тел, но считает этот эффект ненаблюдаемым из-за его малости;
— 17 июня: Эйнштейн обращается в Бернский университет с просьбой предоставить ему должность приват-доцента. Просьба не удовлетворена, так как не представлена обязательная в таком случае еще не опубликованная работа.

1908 г. — 28 февраля: после вторичной попытки Эйнштейн получает должность приват-доцента в Берне. Представленная не опубликованная ранее работа называется «Влияние закона распределения энергии в излучении черного тела на состав излучения»;
— в начале года к Эйнштейну приезжает первый сотрудник Я. Лауб; они пишут вместе две статьи;
— 21 декабря Майя с отличием защищает в Бернском университете диссертацию по романской филологии.

1909 г. — в марте и октябре Эйнштейн заканчивает две статьи, в каждой из которых содержатся новые гипотезы, касающиеся теории излучения черного тела. Пользуясь современной терминологией, там предлагаются принципы дополнительности и принцип соответствия. Октябрьская работа была представлена на конференции в Зальцбурге, первой физической конференции, в которой участвовал Эйнштейн;
— 6 июля: заявление об увольнении (с 15 октября) из патентного бюро. Отставка с должности приват-доцента;
— 8 июля: Эйнштейн получает первое почетное докторское звание от Женевского университета [4]);
— 15 октября Эйнштейн вступает в должность экстраординарного профессора Цюрихского университета с начальным окладом 4500 франков в год

1910 г. — март: Майя выходит замуж за Пауля Винтелера, сына Поста Винтелера;
— 28 июля рождается второй сын, Эдуард («Тедэ» или «Тедель», ум. в 1965 г. в психиатрической лечебнице в Цюрихе);
— октябрь: завершение работы о критической оналесценции последней крупной статьи в области классической статистической физики.

1911 г. — император Франц-Иосиф подписывает декрет, которым Эйнштейн с 1 апреля назначается профессором Пражского университета Карла-Фердинанда;

---

[4]) Позднее Эйнштейн получил также почетные степени от университетов Цюриха, Ростока, Мадрида, Брюсселя, Буэнос-Айреса, Лондона, Оксфорда, Кембриджа, Глазго, Лидса, Манчестера, Гарварда, Принстона, Нью-Йорка (Олбени), Пешива и Сорбонны. Скорее всего, этот перечень неполон.

— март: переезд в Прагу;
— июнь: Эйнштейн осознает, что искривление лучей света может быть экспериментально установлено во время затмения Солнца. Он рассчитывает угол отклонения равным 0,83″ (вдвое меньше правильного значения);
— 30 октября — 3 ноября: первый Сольвеевский конгресс. Эйнштейн делает заключительный доклад «К современному состоянию проблемы удельной теплоемкости».

1912 г. — начало февраля: назначение профессором Цюрихского политехникума;
— август: переезд в Цюрих.

1912—1913 гг. — сотрудничество с Гроссманом (занимающим пост профессора математики в политехникуме) в создании основ ОТО. Тяготение впервые описывается метрическим тензором. Авторы считают, что им удалось доказать, будто уравнения гравитационного поля не могут быть общековариантными.

1913 г. — весна: в Цюрих приезжают Планк и Нернст, чтобы выяснить отношение Эйнштейна к переезду в Берлин. Ему предлагается членство в Прусской академии наук, должность профессора Берлинского университета без обязательной учебной нагрузки и пост директора организуемого Физического института им. кайзера Вильгельма;
— 12 июня: Планк, Нернст, Рубенс и Варбург официально представляют кандидатуру Эйнштейна к избранию в члены Прусской академии наук;
— 3 июля: предложение принимается 21 голосом «за» и одним «против» (и утверждается императором Вильгельмом II 12 ноября);
— 7 декабря: Эйнштейн принимает предложение из Берлина.

1914 г. — 6 апреля: переезд всей семьи в Берлин. Вскоре после этого Эйнштейны расходятся. Милева с сыновьями возвращается в Цюрих. Альберт переезжает в холостяцкую квартиру на Виттельсбахерштрассе, 13;
— 26 апреля: в берлинской газете «Die Vossische Zeitung» публикуется первая газетная статья Эйнштейна. В ней идет речь о теории относительности;
— 2 июля: Эйнштейн произносит речь при вступлении в должность на заседании Прусской академии наук;
— 1 августа: начало первой мировой войны.

1915 г. — начало года: выполнение вместе с де Хаазом гиромагнитных экспериментов в Физико-техническом институте в Шарлоттенбурге;
— Эйнштейн подписывает «Обращение к жителям Европы», в котором все, кому дорога европейская культура, призываются к объединению в «Европейскую лигу»; это, видимо, первый политический документ, подписанный Эйнштейном;
— конец июня — начало июля: Эйнштейн читает в Геттингене шесть лекций об ОТО («К моей радости, мне удалось полностью убедить Гильберта и Ф. Клейна»);
— 4 ноября: возврат к требованию общей ковариантности в ОТО с тем, однако, ограничением, что допускаются лишь унимодулярные преобразования;
— 11 ноября: замена требования унимодулярности еще более жестким требованием $(-\det g_{\mu\nu})^{1/2} = 1$;
— 18 ноября: первые постньютоновы результаты. Эйнштейн получает для векового смещения перигелия Меркурия значение 43″. Он также обнаруживает, что угол, на который отклоняются лучи света, вдвое больше значения, полученного им в 1911 г.;
— 20 ноября: Давид Гильберт представляет в Геттингенское научное общество статью, содержащую в окончательном виде урав-

пения гравитационного поля (а также излишнее предположение о структуре тензора энергии-импульса);
— 25 ноября: завершение создания логической схемы ОТО. Отказ от ограничений, введенных 4 и 11 ноября.

1916 г. — 20 марта: в редакцию журнала «Annalen der Physik» поступает первое систематическое изложение ОТО — статья Эйнштейна «Основы общей теории относительности». В том же году эта работа выходит в виде книги;
— 5 мая: Эйнштейн сменяет Планка на посту президента Немецкого физического общества;
— июнь: первая статья Эйнштейна о гравитационных волнах. Он обнаруживает (выражаясь современным языком), что гравитон имеет лишь два состояния поляризации;
— июль: возврат к квантовой теории. В течение следующих восьми месяцев вышли три пересекающиеся по теме статьи, в которых даны выражения для коэффициентов спонтанного и индуцированного излучения и поглощения, новый вывод закона Планка, и сделано первое публичное заявление в печати о том, что световой квант с энергией $h\nu$ переносит импульс $h\nu/c$. Первые признаки беспокойства по поводу роли «случая» в квантовой физике;
— декабрь: Эйнштейн заканчивает статью «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)», самый известный из всех его трудов, впоследствии переведенный на многие языки;
— декабрь: император утверждает назначение Эйнштейна членом совета управляющих Физико-технического института. Он выполнял эти функции с 1917 по 1933 г.

1917 г. — февраль: первая работа Эйнштейна по космологии, где он вводит космологический член;
— Эйнштейн переносит заболевание печени, желтуху; у него обнаруживают язву желудка; общая слабость. За ним ухаживает двоюродная сестра Эльза. Выздоровел он лишь в 1920 г.;
— 1 октября: начинает работать Институт им кайзера Вильгельма (в области экспериментальной и теоретической физики), директором которого является Эйнштейн.

1918 г. — февраль: вторая работа о гравитационных волнах; в ней содержится квадрупольная формула;
— ноябрь: Эйнштейн отклоняет предложение переехать в Цюрих, направленное совместно из университета и политехникума.

1919 г. — январь — июнь: большую часть этого периода Эйнштейн проводит в Цюрихе, читая серию лекций в университете;
— 14 февраля: развод с Милевой;
— 29 мая: предоставляется возможность измерить отклонение лучей света во время полного солнечного затмения. Наблюдения выполняются под руководством Эддингтона на острове Принсипи и под руководством Кроммелина на севере Бразилии;
— 2 июня: женитьба на разведенной двоюродной сестре Эльзе Эйнштейн-Ловенталь[6]) (род. в 1876 г.). Еще раньше обе ее дочери, Ильзе (род. в 1897 г.) и Марго (род. в 1899 г.), официально приняли фамилию Эйнштейн. Переезд в квартиру на Габерландштрассе, 5;
— 22 сентября: Эйнштейн получает от Лоренца телеграмму, в которой говорится, что предварительный анализ данных на-

[6]) Отец Эльзы, Рудольф, был двоюродным братом отца Альберта, Германа. Ее мать, урожденная Фанни Кох, была родной сестрой матери Альберта, Паулины. Таким образом, Эльза приходилась Альберту троюродной сестрой по отцовской и двоюродной — по материнской линии.

блюдения майского затмения дает смещение в пределах от «значения Ньютона» (0,86″) до «значения Эйнштейна» (1,73″);
— 6 ноября: на совместном заседании Королевского общества и Королевского астрономического общества в Лондоне объявлено, что наблюдения майского затмения подтверждают расчеты Эйнштейна;
— 7 ноября: заголовки в лондонской «Times» («Революция в науке», «Новая теория строения Вселенной», «Отказ от взглядов Ньютона»);
— 9 ноября: заголовок в «New York Times» («Свет в небесах перекосился... Триумф теории Эйнштейна»). Такого рода высказывания в газетах знаменуют начало отношения общественности к Эйнштейну как к личности мирового масштаба;
— декабрь: Эйнштейн получает единственную присвоенную ему в Германии почетную степень доктора медицины от университета Ростока;
— беседы о сионизме с Куртом Блюменфельдом.

1920 г. — 12 февраля: беспорядки во время чтения Эйнштейном лекции в Берлинском университете;
— февраль: смерть матери в доме Эйнштейна;
— июнь: чтение лекций в Норвегии и Дании;
— первая встреча с Бором в Берлине;
— 24 августа: массовый митинг протеста против ОТО в Берлине, на котором присутствовал Эйнштейн;
— 27 августа: публикация в «Berliner Tageblatt» гневной отповеди Эйнштейна. Немецкие газеты сообщают о его намерении покинуть Германию. Лауэ, Нернст, Рубенс, а также министр культуры Конрад Хениш выражают солидарность с заявлениями Эйнштейна;
— 8 сентября: Эйнштейн направляет Хенишу письмо, в котором говорит, что с Берлином его связывают самые тесные человеческие и научные связи. Он добавляет, что откликнется на предложения из-за рубежа лишь в том случае, если его вынудят к этому внешние обстоятельства;
— 23 сентября: стычка с Филиппом Ленардом на конференции в Бад-Наугейме;
— 27 октября: Эйнштейн читает лекцию при вступлении в специально созданную для него в Лейдене должность приглашенного профессора. Эта должность позволяла ему приезжать с Лейден на несколько недель в году [*]);
— начиная с 1920 г. Эйнштейн выступает в печати со статьями, посвященными общественным проблемам;
— 31 декабря: награждение орденом «За заслуги».

1921 г. — 2 апреля — 30 мая: первая поездка в США (совместно с Х. Вейцманом) для сбора средств с целью создания университета Хеврю в Иерусалиме. Вручение в Колумбийском университете медали Барнарда. Прием президентом Гардингом в Белом доме. Поездки с лекциями по теории относительности в Чикаго, Бостон и Принстон. На обратном пути Эйнштейн делает остановку в Лондоне и посещает могилу Ньютона.

1922 г. — январь: завершение первой работы по единой теории поля;
— март — апрель: поездка в Париж способствует нормализации отношений между Францией и Германией;

---

*) Он вновь посещал Лейден в ноябре 1921, мае 1922, мае 1923, октябре 1924, феврале 1925 и в апреле 1930 г. Эта должность была официально упразднена 23 сентября 1952 г.

— Эйнштейн принимает предложение участвовать в работе Комитета Лиги Наций по интеллектуальному сотрудничеству. Германия будет принята в Лигу Наций лишь через четыре года;
— 24 июня: убийство министра иностранных дел Германии Вальтера Ратенау, с которым был знаком Эйнштейн;
— 8 октября: Эйнштейн и Эльза отправляются из Марселя в Японию. По пути они посещают Коломбо, Сингапур, Гонконг и Шанхай;
— 9 ноября: Эйнштейну присуждается Нобелевская премия по физике за 1921 г. Он находится в это время на пути в Японию;
— 17 ноября — 29 декабря: пребывание в Японии;
— 10 декабря: на торжествах по поводу вручения Нобелевских премий Эйнштейна представляет посол Германии Рудольф Надольны [7]). Официальный текст представления гласит: «А. Эйнштейну за его заслуги в области теоретической физики и, в особенности, за открытие закона фотоэлектрического эффекта».

1923 г. — 2 февраля: на обратном пути из Японии Эйнштейн совершает 12-дневную поездку по Палестине; 8 февраля он становится первым почетным гражданином Тель-Авива. По пути из Палестины в Германию Эйнштейн посещает Испанию;
— март: разочаровавшись в эффективности (но не в целях) Лиги Наций, Эйнштейн покидает Комитет по интеллектуальному сотрудничеству;
— июнь — июль: Эйнштейн помогает основать общество «Друзей новой России» и становится членом его исполнительного комитета [8]);
— июль: лекция о теории относительности в Гётеборге. Открытие эффекта Комптона кладет конец длительному сопротивлению понятию фотона;
— декабрь: впервые Эйнштейн публикует статью, в которой содержится предположение о том, что квантовые эффекты могут следовать из переопределенных общерелятивистских уравнений поля.

1924 г. — в знак солидарности Эйнштейн становится членом еврейской общины Берлина и платит туда взносы;
— редактирование первого сборника научных статей физического факультета университета Хебрю;
— в Потсдаме начинает работать «Институт Эйнштейна», расположенный в «башне Эйнштейна». Основным научным прибором там является «телескоп Эйнштейна»;
— Ильзе выходит замуж за Рудольфа Кайзера;
— июнь: возобновление работы в Комитете по интеллектуальному сотрудничеству;
— 7 июня: Эйнштейн заявляет, что он не возражает против мнения Министерства культуры Германии, согласно которому избрание его членом Прусской академии автоматически означает приобретение им прусского гражданства (он сохраняет и швейцарское гражданство);
— декабрь: последнее крупное достижение Эйнштейна: на рассмотрения статистики флуктуаций ему удается привести независимые аргументы в пользу существования волн материи. В это же время обнаружена им и конденсация Бозе — Эйнштейна.

1925 г. — май — июнь: поездка в Южную Америку. Посещение Буэнос-Айреса, Рио-де-Жанейро и Монтевидео;

---

[7]) После возвращения Эйнштейна из Японии премию вручил ему на дому посол Швеции.
[8]) Он никогда не был в СССР. Общество было распущено в 1933 г.

— Эйнштейн подписывает (вместе с Ганди и другими) воззвание, призывающее отказаться от обязательной военной службы;
— награждение медалью Копли;
— член Совета управляющих университета Хебрю (до июня 1928 г.).

1926 г. — награждение золотой медалью Королевского астрономического общества;

1927 г. — 7 мая: Ганс Альберт женится в Дортмунде на Фриде Кнехт;
— октябрь: пятый Сольвеевский конгресс. Начало диалога Эйнштейн — Бор по фундаментальным проблемам квантовой механики.

1928 г. — февраль или март: упадок сил в результате физического перенапряжения. У Эйнштейна обнаружено расширение сердца. В течение четырех месяцев он на постельном режиме и бессолевой диете. Он полностью выздоравливает, но испытывает слабость в течение еще около года;
— 13 апреля, пятница: Элен Дюкас приступает к своим обязанностям.

1929 г. — Эйнштейна впервые принимает королевская семья Бельгии. Он завязывает дружбу с королевой Елизаветой, с которой поддерживает переписку до конца дней;
— 28 июня: Планк получает первую, а Эйнштейн вторую медаль им. Планка. Во время церемонии ее вручения Эйнштейн заявляет, что ему «неловко» получать столь высокую награду, так как все, что он сделал в квантовой физике, есть только «случайные удачи» в ходе «безуспешных попыток решить проблему в целом».

1930 г. — родился Бернард Цезар («Гарди»), сын Ганса Альберта и Фриды, первый внук Эйнштейна [9]);
— май: Эйнштейн подписывает манифест Международной лиги женщин за мир и свободу, призывающий ко всеобщему разоружению;
— 29 ноября: Марго выходит замуж за Дмитрия Марьянова (этот брак вскоре заканчивается разводом);
— 11 декабря — 4 марта 1931 г.: вторая поездка в США. В основном Эйнштейн работает в Калифорнийском технологическом институте;
— 13 декабря: мэр Нью-Йорка Джимми Уокер вручает Эйнштейну ключ от города;
— 19—20 декабря: поездка на Кубу.

1931 г. — апрель: отказ от космологического члена, как от излишнего и неоправданного предположения;
— 30 декабря — 4 марта 1932 г.: третья поездка в США. Пребывание в основном в Калифорнийском технологическом институте.

1932 г. — февраль: будучи в Пасадене, Эйнштейн протестует против обвинения немецкого пацифиста Карла фон Осецкого в измене;
— апрель: окончательный выход из Комитета по интеллектуальному сотрудничеству;
— октябрь: назначение профессором Института высших исследований в Принстоне, Нью-Джерси. Первоначально Эйнштейн планировал делить свое время поровну между Берлином и Принстоном;
— 10 декабря: отъезд вместе с Эльзой из Германии в США. Планировалось, что это будет непродолжительная поездка, но в Германию они больше не вернулись.

---

[9]) Второй внук умер в возрасте шести лет. Ганс Альберт удочерил позднее ребенка по имени Эвелин.

1933 г. — 30 января: приход нацистов к власти;
— 20 марта: нацисты совершают налет на летний дом Эйнштейна в Капуте, где коммунисты якобы хранили оружие;
— 28 марта: по возвращении в Европу Эйнштейн выходит из членов Прусской академии наук. Они с женой останавливаются в Ле-Кок-сюр-мер на побережье Бельгии; к ним приставлены два бельгийских телохранителя. Здесь к Эйнштейнам присоединяются Ильзе, Марго, Элен Дюкас и Вальтер Майер. В течение последующих нескольких месяцев Эйнштейн непродолго выезжает в Англию и в Швейцарию, где в последний раз видит своего сына Эдуарда. Рудольф Кайзер организует перевозку бумаг Эйнштейна дипломатической почтой из Берлина во Францию;
— 21 апреля: отставка с поста члена Баварской академии наук;
— часть переписки Эйнштейна с Фрейдом опубликована в виде книги «Зачем воевать?»;
— 10 июня: Спенсеровская лекция в Оксфорде;
— 9 сентября: Эйнштейн навсегда покидает Европейский континент и отправляется в Англию;
— 17 октября: с гостевыми визами Эйнштейн, его жена, Элен Дюкас и Майер приезжают в США и в тот же день отправляются в Принстон. Через несколько дней Эйнштейны и Элен Дюкас переезжают в дом № 2 по Лайбрери-плейс; Ильзе и Марго остаются в Европе.

1934 г. — смерть Ильзе Кайзер-Эйнштейн в Париже. Вскоре Марго с мужем приезжают в Принстон.

1935 г. — краткая поездка на Бермуды, откуда Эйнштейн направляет официальную просьбу о предоставлении ему права постоянного проживания в США. Это была его последняя поездка за пределы страны;
— осень: переезд в дом № 112 по Мерсер-стрит;
— награждение медалью Франклина.

1936 г. — 7 сентября: смерть Марселя Гроссмана;
— 20 декабря: смерть Эльзы;
— Ганс Альберт получает в Цюрихском политехникуме степень доктора наук.

1939 г. — в Принстон к брату приезжает Майя; в его доме она проведет остаток дней;
— 2 августа: Эйнштейн посылает Ф. Д. Рузвельту письмо, в котором обращает его внимание на возможность использования атомной энергии в военных целях.

1940 г. — 1 октября: судья Филипп Форман в Трентоне приводит к присяге как граждан США Марго, Элен Дюкас и Эйнштейна. Эйнштейн сохраняет и швейцарское гражданство.

1943 г. — Эйнштейн подписывает контракт (действовавший до 30 июня 1946 г.) о сотрудничестве в качестве консультанта научно-исследовательского отдела Бюро артиллерии ВМФ США (тема «Боеприпасы и взрывчатые вещества», подтема «ВВ большой силы и ракетное топливо») с окладом 25 дол. в день.

1943 — 1944 г. — Эйнштейн от руки переписывает статью 1905 г. о теории относительности, которая продается с аукциона в Канзас-сити за 6 млн. дол. в рамках сбора средств на нужды военной промышленности. (Сейчас эта рукопись хранится в Библиотеке конгресса.)

1945 г. — 10 декабря: выступление с речью в Нью-Йорке: «Выиграна война, а не мир».

1946 г. — Майя парализована и остаток дней прикована к постели;
— Эйнштейн дает согласие стать председателем Чрезвычайного комитета ученых-атомщиков;

— октябрь: открытое письмо Генеральной ассамблее ООН, содержащее призыв создать мировое правительство.

1947 г. — Ганс Альберт становится профессором в Калифорнийском университете в Беркли.

1948 г. — 4 августа: смерть Милевы в Цюрихе;
— декабрь: пробная лапоротомия показывает, что у Эйнштейна аневризма брюшной аорты.

1949 г. — 13 января: Эйнштейн выписывается из больницы;
— публикация «некролога» — статьи «Автобиографические заметки».

1950 г. — 18 марта: Эйнштейн подписывает и запечатывает свое последнее завещание. Единственным душеприказчиком назначается доктор Отто Натан. Распорядителями имущества назначены совместно О. Натан и Элен Дюкас. По завещанию все письма и рукописи должны быть переданы на хранение в университет Хебрю. Свою скрипку Эйнштейн завещает внуку Бернарду Цезару.

1951 г. — смерть Майи в Принстоне.

1952 г. — июль: смерть Пауля Винтелера в доме Бессо в Женеве;
— ноябрь: Эйнштейн получает предложение занять пост президента Израиля и отклоняет его.

1954 г. — 14 апреля: в прессе опубликовано заявление Эйнштейна, где он выражает поддержку Р. Оппенгеймеру, против которого выдвигались обвинения в антиамериканской деятельности;
— последняя встреча Эйнштейна и Бора (в Принстоне);
— у Эйнштейна обнаруживают гемолитическую анемию.

1955 г. — 15 марта: смерть Бессо;
— 11 апреля: Эйнштейн подписывает последнее письмо (Бертрану Расселу), в котором соглашается поддержать призыв ко всем странам отказаться от ядерного оружия. На той же неделе он пишет последнюю фразу в неоконченной рукописи: «Что касается бушующих повсюду политических страстей, то они требуют жертв»;
— 13 апреля: разрыв аневризмы аорты;
— 15 апреля: Эйнштейна перевозят в принстонскую больницу;
— 16 апреля: из Беркли в Принстон приезжает Ганс Альберт;
— 17 апреля: Эйнштейн звонит Элен Дюкас и просит принести ему письменные принадлежности и его последние выкладки;
— 18 апреля, 1 ч 15 мин ночи: смерть Эйнштейна. Тело кремировано в Трентоне в 16 ч. Пепел развеян Отто Натаном и Паулем Оппенгеймом в месте, которое сохранено в тайне;
— 21 ноября: в Берне родился сын Бернарда Цезара, Томас Мартин, первый из правнуков Альберта Эйнштейна.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

(Звездочка после имени ученого означает, что в предметном указателе подробно перечислены его работы)

Абрагам Макс (*Abraham* Max), 1875—1922 151—153, 156, 197, 203, 219—224, 226, 227

Авенариус Рихард (*Avenarius* Richard), 1843—1896 306

Авогадро Амедео (*Avogadro* Amedeo), 1776—1856 81

Адамар Жак (*Hadamard* Jacques), 1865—1963 157, 301, 480, 482

Адлер Фридрих (*Адлер* Friedrich), 1879—1960 19

Аллен Вуди (*Allen* Woody), род. 1935 26

Ампер Андре Мари (*Ampère* André-Marie), 1775—1836 236

Араго Доминик Франсуа Жан (*Arago* Dominique François Jean), 1786—1853

Аронс Лео (*Arons* Leo), 1860—1919 19, 306

Аррениус Сванте (*Arrhenius* Svante), 1859—1927 475, 479—482

Ауривиллиус Кристофер (*Aurivillius* Christopher) 1853—1928 473, 482

Бакки Густав (*Bucky* Gustav), 1880—1963 454, 456

Бальзак Оноре де (*Balzac* Honore de), 1799—1850 24

Бальмер Иоганн Якоб (*Balmer* Johann Jakob), 1825—1898 344

Бамбергер Эдгар (*Bamberger* Edgar), 1883—1952 434

Баргман Валентин (*Bargmann* Valentin), род. 1908 143, 148, 264, 319, 320, 334, 335, 433, 447, 448, 471

Баркла Чарлз Гловер (*Barkla* Charles Glover), 1877—1944 477

Барнетт Самьюэл Джэксон (*Barnett* Samuel Jackson), 1873—1956 237, 239, 240

Бах Иоганн Себастьян (*Bach* Johann Sebastian), 1685—1750 24

Бейтман Гарри (*Bateman* Harry), 1882—1946 417

Беккерель Жан (*Becquerel* Jean), 1878—1953 157

Бен-Гурион Давид (*Ben Gurion* David), 1886—1973 18, 302

Бергман Питер Габриель (*Bergmann* Peter Gabriel), род. 1915 257, 319—321, 327, 334, 471

Бергсон Анри (*Bergson* Henry), 1859—1941 19, 35, 157, 482, 483

Берлин Исайя (*Berlin* Isaiah), род. 1909 21

Берлинер Арнольд (*Berliner* Arnold), 1862—1942 306

Бернулли Даниил (*Bernoulli* Daniel), 1700—1782 83

Бернштейн Аарон (*Bernstein* Aaron), 1812—1884 533

Бессо Микель Анжело (*Besso* Michele Angelo), 1873—1955 50, 110, 134, 159, 168, 177, 182, 194, 202, 249, 272, 285, 288, 290, 387, 394, 434, 448, 450, 454, 456, 458, 534, 542

Бете Ганс (*Bethe* Hans), род. 1906 452, 465

Бетховен Людвиг ван (*Beethoven* Ludwig Von), 1770—1827 24, 46, 169, 176

Блюменфельд Курт (*Blumenfeld* Kurt), 1884—1963 302, 454

Бозе Шатьендранат * (*Bose* Satyendra Nath), 1894—1974 61, 344, 361, 405—414, 416, 420, 422

Бойд Джулиан (*Boyd* Julian), 1903—1980 143

Больцман Людвиг (*Boltzmann* Ludwig), 1844—1906 27, 51, 57—72, 74—79, 83, 84, 102, 347, 350, 354, 361, 375—378, 406, 407, 411, 461

Бор Нильс Хенрик Давид • (*Bohr* Niels Henrik David), 1885—1962 12—15, 23, 28, 33, 36, 139, 183, 238, 310, 342—345, 369, 370, 398—405, 409, 423—429, 437—439, 442, 473, 474, 477, 480, 482, 483, 538, 540, 542
Борк Альфред (*Bork* Alfred), род. 1926 118
Борн Макс*(*Born* Max), 1882—1970 137, 162, 163, 167, 206—208, 223, 288, 294, 304, 380, 387, 395, 403, 404, 423, 424, 440, 442, 445, 448, 486
Боте Вальтер (*Bothe* Walter), 1891—1957 404, 417
Брагинский Владимир Борисович, род. 1931 210, 268, 269
Брамс Иоганнес (*Brahms* Johannes), 1833—1897 24
Браун Герберт Ранхем (*Brown* Herbert Runham), 1879—1949 19, 487
Браун Фердинанд (*Braun* Ferdinand), 1850—1918 476
Браш Стивен (*Brush* Stephen), род. 1935 118
Брехт Бертольд (*Brecht* Bertolt), 1898—1956 24
Бриан Аристид (*Briand* Aristide), 1862—1932 309
Брилл Альфред (*Brill* Alfred), 1885—1949 15
Бриллюэн Леон (*Brillouin* Léon), 1889—1969 417
Бриллюэн Марсель (*Brillouin* Marcel), 1854—1948 476, 482
Бройль Луи де (*Broglie* Lui de), род. 1892 28, 339, 345, 405, 417—421, 426, 486, 487
Бройль Морис де (*Broglie* Maurice de), 1875—1960 417
Броун Роберт (*Brown* Robert), 1773—1858 87, 95
Брох Герман (*Broch* Hermann), 1886—1951 24, 484
Брэгг Уильям Генри (*Bragg* William Henry), 1862—1942 476
Брэгг Уильям Лоренс (*Bragg* William Laurence), 1890—1971 476
Брюнсвик Леон (*Brunschvicg* Léon), 1869—1944 157
Буа Анри дю (*Bois* Henri du), 1863—1918 236, 461
Бунзен Роберт (*Bunsen* Robert), 1811—1899 344
Буркхарт Генрих (*Burkhardt* Heinrich), 1861—1914 90
Бухерер Альфред (*Bucherer* Alfred), 1863—1927 156
Бьянки (Бианки) Луиджи (*Bianchi* Luigi), 1856—1928 265
Бэчер Роберт (*Bacher* Robert), род. 1905 452
Бюхнер Фридрих (*Büchner* Friedrich), 1824—1899 533

Вагнер Рихард (*Wagner* Richard), 1813—1883 24
Вагнер Эрист (*Wagner* Ernst), 1876—1928 482
Вайскопф Виктор (*Weisskopf* Victor), род. 1908 452
Вальдейер-Гарц Вильгельм фон (*Waldeyer-Hartz Wilhelm* von), 1836—1921 480
Ван-дер-Ваальс Иоханес Дидерик (*Waals* Johannes Diderik van der.), 1837—1923 27, 85, 87, 470
Вант-Гоффф Якоб Хендрик (*Hoff* Jacobus Henricus van't), 1852—1911 86, 88, 89
Варбург Эмиль (*Warburg* Emil), 1846—1931 201, 229, 306, 366, 478, 479, 480, 482, 536
Вебер Генрих Фридрих (*Weber* Heinrich Friedrich), 1843—1912 51, 52, 372, 374, 375, 380
Вебер Йозеф (*Weber* Joseph), род. 1919 268
Веблен Освальд (*Veblen* Oswald), 1880—1960 110, 470
Вейль Герман (*Weyl* Hermann), 1885—1955 14, 169, 186, 204, 249, 251, 252, 256, 264, 265, 279, 280, 282, 306, 311, 313, 314, 325, 327—330, 333, 455
Вейнберг (Вайнберг) Стивен (*Weinberg* Steven), род. 1933 209, 255
Вейс Пьер (*Weiss* Pierre), 1865—1940 479, 484
Вейцман Хаим (*Weizmann* Chaim), 1874—1952 303, 433, 453, 461, 538
Вентцель Грегор (*Wentzel* Gregor), 1898—1978 396, 471
Вергеланн Харалд (*Wergeland* Harald), род. 1912 387
Вивальди Антонио (*Vivaldi* Antonio), 1678—1741 24
Виганд Альфред (*Wigand* Alfred), 1882—1932 375, 376
Вигнер Юджин (*Wigner* Eugene), род. 1902 14, 422, 436, 464
Вильгельм II император (*Wilhelm II*), 1859—1941 465, 536
Вильсон Вудро (*Wilson* Woodrow), 1856—1924 465

Вильсон Чарлз Томсон Рис (*Wilson* Charles Thomson Rees), 1869—1959 364
Вин Вильгельм (*Wien* Wilhelm), 1864—1928 142, 149, 156, 203, 223, 344, 345, 348, 351, 360, 457, 476—479
Винер Отто (*Wiener* Otto), 1862—1927 480
Винтелер Юст (*Winteler* Jost), 1846—1929 49, 53, 533, 535
Винтелер Науль (*Winteler* Paul), 1882—1952 289, 450, 535, 542
Винтерниц Йозеф (*Winternitz* Josef) 307
Витт Брюс де (*Witt* Bryce de), род. 1923 259
Вихерт Эмиль (*Wiechert* Emil), 1861—1928 117
Волков Джордж (*Volkoff* George), род. 1914 257
Вольфке Мечислав (*Wolfke* Mieczyslaw), 1883—1947 417

Габихт Конрад (*Habicht* Conrad), 1876—1958 131, 133, 144, 175, 179, 180, 456—458, 534
Габихт Науль (*Habicht* Paul), 1884—1948 54, 179, 180, 456—458
Газенорль Фриц (*Hasenöhrl* Fritz), 1874—1915 37, 144, 193
Галилей Галилео (*Galilei* Galileo), 1564—1642 307
Галлер Фридрих (*Haller* Friedrich), 1844—1936 53, 55
Гальвакс Вильгельм (*Hallwachs* Wilhelm), 1859—1922 364
Ганди Мохандас (Махатма) (*Gandhi* Mahatma), 1869—1948 24, 452
Ган Отто (*Hann* Otto), 1879—1968 452
Гардинг Уоррен (*Harding* Warren), 1865—1923 538
Гаудсмит Самьюэл (*Goudsmith* Samuel), 1902—1978 139, 240, 425, 447
Гаусс Карл Фридрих (*Gauss* Carl Friedrich), 1777—1855 210
Гейгер Ханс (*Geiger* Hans), 1882—1945 384, 404, 427
Гейзенберг Вернер (*Heisenberg* Werner), 1901—1976 28, 33, 240, 282, 314, 344, 387, 416, 422, 423, 425, 426, 430, 448, 485, 486
Гейзер Карл Фредерик (*Geiser* Carl Frederick), 1843—1934 51, 204
Гей-Люссак Жозеф Луи (*Gay-Lussac* Joseph Louis), 1778—1850 81
Гейне Генрих (*Heine* Heinrich), 1797—1856 24, 44
Гейтель Ханс (*Geitel* Hans), 1855—1923 363
Гельм Георг Фердинанд (*Helm* Georg Ferdinand), 1881—1923 84
Гельмгольц Герман (*Helmholtz* Hermann), 1821—1894 51, 108, 306,
Герглоц Густав (*Herglotz* Gustav), 1881—1953 208
Герке Эрнст (*Gehrcke* Ernst), 1878—1960 480
Герлах Вальтер (*Gerlach* Walther), 1889—1979 396, 484
Герман Армин (*Hermann* Armin), род. 1933 293, 381
Герц Генрих (*Hertz* Heinrich), 1857—1894 51, 116—118, 129, 141, 268, 307, 308, 350, 363—364, 484
Герц Густав (*Hertz* Gustav), 1887—1975 484
Герц Науль (*Hertz* Paul), 1881—1940 71
Герцог Альбин (*Herzog* Albin) 179
Гессенберг Герхард (*Hessenberg* Gerhard), 1874—1925 325
Гетнер Герхард (*Hettner* Gerhard), 1892—1968 350
Гёдель Курт (*Gödel* Kurt), 1906—1978 13, 20, 472
Гете Иоганн Вольфганг (*Goethe* Johann Wolfgang), 1749—1832 306, 455
Гиббс Джозайя Уиллард (*Gibbs* Josiah Willard), 1839—1903 27, 57, 62, 67, 73, 74, 76, 77
Гийом Шарль (*Guillaume* Charles), 1861—1938 477
Гильберт Давид (*Hilbert* David), 1862—1943 30, 149, 200, 233, 245, 249—254, 256, 263—266, 270, 340, 536
Гитлер Адольф (*Hitler* Adolf), 1889—1945 301, 432
Глаус Беат (*Glaus* Beat), род. 1935 55
Гленн Франк (*Glenn* Frank), 1901—1982 454
Гольдшмидт Роз Голди (*Goldschmidt* Rose Goldie) 464, 465
Гольдшмидт Рудольф (*Goldschmidt* Rudolf), 1876—1950 300
Гонзалес Дж. Дж. (*Gonzalez J. J.*) 387
Горький Максим, 1868—1936 24
Гровс Лесли (*Groves* Leslie), 1896—1970 436
Громмер Яков, ?—1933 281, 282, 313, 314, 318, 328, 447, 461
Гроссман Марсель (*Grossman* Marcel), 1878—1936 30, 50, 51, 53, 55, 90, 130, 164, 185, 197, 200, 204, 205, 208—219, 222, 223,

226, 233, 234, 242, 276, 337, 454, 456, 534, 536, 541
Гроссман Эльзбет (*Grossman* Elsbeth) 217
Гульстранд Алвар (*Gullstrand* Alvar), 1862—1930 476, 481—483
Гурвиц Адольф (*Hurwitz* Adolf), 1859—1919 51, 52
Густав V король Швеции (*Gustav V*), 1858—1950 476
Гюи Луи Жорж (*Gouy* Louis Georges), 1854—1926 96, 479
Гюи Шарль Эжен (*Guye* Charles Eugene), 1866—1942 149

Дайсон Фрэнк Уотсон (*Dyson* Frank Watson), 1868—1939 169, 291, 292
Дален Нильс Густав (*Dalen* Nils Gustaf), 1869—1937 476
Далленбах Вальтер (*Dallenbach* Walter), род. 1892 480
Дальтон Джон (*Dalton* John), 1766—1844 79, 80, 81, 157, 383
Дарбу Жан Гастон (*Darboux* Jean-Gaston), 1842—1917 476
Дарвин Чарлз Роберт (*Darwin* Charles Robert), 1809—1882 51, 346, 477, 478
Дебай Петер (*Debye* Peter), 1884—1966 35, 380, 387, 396, 397, 417, 420, 476, 477, 484
Деландр Анри (*Deslandres* Henri), 1853—1948 294
Дельсо Жозеф (*Delsaulx* Joseph), 1828—1891 95
Демокрит (Democritus), V в. до н. э. 79
Джеммер Макс (*Jammer* Max), род. 1915 440
Джермер Лестер (*Jermer* Lester), 1896—1971 486
Джинс Джеймс Хопвуд (*Jeans* James Hopwood), 1877—1946 169, 358, 360
Джонс Эрнест (*Jones* Ernest), 1897—1958 485
Джонсон Элвин (*Johnson* Alvin), 1874—1971 488
Джотто ди Бондоне (*Giotto di Bondone*), 1266?—1337 24
Джулиус Виллем (*Julius* Willem), 1860—1925 201, 306, 480
Дикке Роберт (*Dicke* Robert), род. 1916 210, 225
Диккенс Чарлз (*Dickens* Charles), 1812—1870 24, 54
Дин Ги К. (*Dean* Guy K.) 454, 455
Дирак Поль Адриен Морис (*Dirac* Paul Adrien Maurice), 1902—1984 28, 43, 110, 344, 405, 409, 415, 422, 426, 469, 486, 487
Дондер Теофил де (*Donder* Théophile de), 1872—1957 482
Достоевский Фёдор Михайлович, 1821—1881 24
Дрейфус Берта (*Dreyfus* Bertha), 1871—1944 19
Дросте Иоханнес (*Droste* Johannes), 1886—1963 283
Друде Пауль (*Drude* Paul), 1863—1906 118
Дуглас Дэвид (*Douglass* David), род. 1932 269
Дуан Уильям (*Duane* William), 1872—1935 366
Дьюар Джеймс (*Dewar* James), 1842—1923 375, 380, 382
Дэвиссон Клинтон Джозеф (*Davisson* Clinton Joseph), 1881—1958 421, 486
Дюкас Элен (*Dukas* Helena), 1896—1982 17, 18, 44, 54—56, 70, 110, 112, 143, 175, 180, 230, 305, 337, 399, 432, 434, 435, 437, 449, 450, 453, 455, 461, 467, 470, 474, 540, 541, 542
Дюлонг Пьер Луи (*Dulong* Pierre Louis), 1785—1838 373

Евклид (Euclid), род. 295 до н. э. 295
Елизавета королева бельгийская (*Elisabeth*), 1876—1965 540

Жувенель Бертран де (*Jouvenel* Bertrand de), род. 1903 18

Зееман Питер (*Zeeman* Pieter), 1865—1943 29, 34, 476, 480
Зелиг Карл (*Seelig* Carl), 1894—1962 56, 462
Зольднер Иоханн Георг фон (*Soldner* Johann Georg von), 1776—1833 193
Зоммерфельд Арнольд (*Sommerfeld* Arnold), 1868—1951 35, 84, 106, 182, 208, 241, 242, 290, 299, 367, 370, 379, 386, 398, 452, 458, 471, 477, 478, 484

Израэль Вернер (*Israel* Werner), род. 1931 255
Инфельд Леопольд (*Infeld* Leopold), 1898—1968 282, 334, 448, 470

Иордан Паскуаль (*Jordan* Pascual), род. 1902 321, 386
Ишивара Джун (*Ishivara* Jun), 1881—1947 115

Йост Рес (*Jost* Res), род. 1918 50, 426, 560

Казандзакис Никос (*Kazantzakis* Nikos), 1883—1957 24
Казимир Хендрик (*Casimir* Hendrik), род. 1909 430
Кайзер Рудольф (*Kayser* Rudolf), 1889—1964 12, 55, 130, 308, 432, 539, 541
Калуца Теодор (*Kaluza* Theodor), 1885—1954 314—319
Камерлинг-Оннес Хейке (*Kamerlingh Onnes* Heike), 1853—1926 52, 236, 460, 461, 476, 480, 534
Кан Борис (*Kahn* Boris), 1911—1944 416
Канниццаро Станислао (*Cannizzaro* Stanislao), 1826—1910 80, 81
Кансмен Чарлз (*Kunsmen* Charles), род. 1890 421
Кант Иммануил (*Kant* Immanuel), 1724—1804 20, 46, 307, 533
Кантони Джованни (*Cantoni* Giovanni), 1818—1897 95
Каптейн Якобус (*Kapteyn* Jacobus), 1851—1922 468
Карбонель Иньяс (*Carbonelle* Ignace), 1829—1889 95
Карман Теодор фон (*Karman* Theodore von), 1881—1963 380
Карно Сади (*Carnot* Sadi), 1796—1832 63
Картан Эли (*Cartan* Elie), 1869—1951 157, 217, 218, 325, 331, 332
Кауфман Брурия (*Kaufman* Bruria), род. 1918 335, 336, 472
Кауфман Вальтер (*Kaufman* Walter), 1871—1947 152—156, 159, 160
Кац Марк (*Kac* Mark), род. 1914 103
Кеезом Виллем Хендрик (*Keesom* Willem Hendrik), 1876—1956 416
Кекуле фон Штрадониц Август (*Kekulé* von Stradonitz August), 1829—1896 80
Кельвин — см. Томсон Уильям (Kelvin)
Кемени Джон (*Kemeni* John), род. 1926 472
Кеплер Иоганн (*Kepler* Johannes), 1571—1630 294, 306
Кесслер Гарри (*Kessler* Harry), 1868—1937 306, 308
Кирстен Криста (*Kirsten* Christa) 56
Кирхгоф Густав Роберт (*Kirchhoff* Gustav Robert), 1824—1887 34, 51, 344, 346—348, 350
Клаузиус Рудольф Юлиус (*Clausius* Rudolf Julius), 1822—1888 63, 64, 83, 85
Клейн Мартин (*Klein* Martin), род. 1924 62, 63, 69, 411
Клейн Оскар (*Klein* Oskar), 1894—1977 314, 316—320, 331
Клейн Христиан Феликс (*Klein* Felix), 1849—1925 84, 210, 251, 253, 256, 263, 264, 266, 267, 309, 310, 334, 340, 536
Клеменс Джералд Морис (*Clemence* Gerald Maurice), 1908—1974 14
Клайнер Альфред (*Kleiner* Alfred), 1849—1916 90, 178, 185
Кнудсен Мартин (*Knudsen* Martin), 1871—1949 61, 104, 476, 477
Кокс Анн (*Kox* Anne), род. 1948 124, 162
Комптон Артур (*Compton* Arthur), 1892—1962 33, 396, 397, 404, 417, 484, 485, 489
Кон Эмиль (*Cohn* Emil), 1854—1944 117, 118, 159
Кондон Эдвард (*Condon* Edward), 1902—1974 452
Конфуций (*Confucius*), 551—479 до н. э. 307
Коперник Николай (*Copernicus* Nicholas), 1473—1543 184, 294, 477, 478
Корелли Арканджело (*Corelli* Arcangelo), 1653—1713 24
Коттлер Фридрих (*Kottler* Friedrich), 1886—1965 219
Кох Фанни (*Koch* Fanny), 1852—1926 286, 288, 537
Кох Цезарь (*Koch* Caesar), 1854—1941 129, 533
Кох Якоб (*Koch* Jakob), 1850—? 288
Коши Огюстен Луи (*Cauchy* Augustin-Louis), 1789—1857 116
Крамерс Хендрик Антони (*Kramers* Hendrik Anton), 1894—1952 139, 396, 398, 401, 403, 416
Крейчнен Роберт Гарри (*Kratchnan* Robert Harry), род. 1928 472
Кречман Эрих (*Kretschmann* Erich) 472, 482, 483

Кристоффель Эльвин Бруно (*Christoffel* Elwin Bruno), 1829—1900 210
Кроммелин Эндрю (*Crommelin* Andrew), 1865—1939 291, 292, 537
Кроче Бенедетто (*Croce* Benedetto), 1866—1952 307
Крупп Густав (*Krupp* Gustav), 1870—1950 290
Крускал Мартин (*Kruskal* Martin), род. 1925 259
Курлбаум Фердинанд (*Kurlbaum* Ferdinand), 1857—1927 349—351, 357
Курсуноглу Бехрам (*Kursunoglu* Behram), род. 1922 335
Кюри Мария (*Curie* Marie), 1867—1934 19, 23, 87, 201, 304—306, 476
Кюри Пьер (*Curie* Pierre), 1859—1906 87, 363

Лавуазье Антуан Лоран (*Lavoisier* Antoine-Laurent), 1743—1794 157
Лагерлеф Сельма (*Lagerlof* Selma), 1858—1940 24
Ладенбург Рудольф (*Ladenburg* Rudolf), 1882—1952 147, 403
Лампа Антон (*Lampa* Anton), 1868—1938 184, 459
Ландау Лев Давидович, 1908—1968 257, 267
Ланде Альфред (*Lande* Alfred), 1888—1975 240
Ланжевен Поль (*Langevin* Paul), 1872—1946 23, 145, 156, 157, 306, 415, 417, 419, 420, 482, 484
Ланцош Корнелий (*Lanczos* Cornelius), 1893—1974 465, 466
Лармор Джозеф (*Larmor* Joseph), 1857—1942 117, 119, 120, 124, 293
Лауб Иоганн Якоб (*Laub* Johann Jakob), 1872—1962 151, 180, 182, 184, 192, 384, 456, 457, 535
Лауэ Макс фон (*Laue* Max von), 1879—1960 140, 146, 147, 159, 193, 203, 223, 224, 229, 339, 367, 439, 452, 463, 474, 476, 479, 489, 492, 538
Ле Бель Жозеф Ашиль (*Le Bel* Joseph Achille), 1847—1930 86
Леверье Урбен Жан Жозеф (*Leverrier* Urbain Jean Joseph), 1811—1877 245, 246, 346
Леви-Чивита Туллио (*Levi-Civita* Tullio), 1873—1941 205, 209, 210, 217, 218, 235, 255, 267, 283, 325
Лейбниц Готфрид Вильгельм (*Leibniz* Gottfried Wilhelm), 1646—1716 34
Лека Морис (*Lecat* Maurice) 257
Леман Отто (*Lehmann* Otto), 1855—1922 476, 477
Ленард Филипп (*Lenard* Philip), 1862—1947 193, 304, 364, 365, 370, 480, 538
Ленин Владимир Ильич, 1870—1924 19
Леруа Эдуар (*LeRoy* Edouard), 1870—1954 157
Лессинг Готхольд Эфраим (*Lessing* Gotthold Ephraim), 1729—1781 449
Лёвенталь Рудольф (*Löwental* Rudolf) 286
Либ Ганс (Lieb Hans), род. 1930 457
Лиман Теодор (*Lyman* Theodor), 1874—1954 480
Липман Габриель Йонас (*Lippman* Gabriel Jonas), 1845—1921 473
Лифшиц Евгений Михайлович, 1915—1985 267
Лодж Оливер Джозеф (*Lodge* Oliver Joseph), 1851—1940 120, 121, 169, 296
Лондон Фриц (*London* Fritz), 1900—1954 416
Лоон Хендрик ван (*Loon* Hendrik van), 1882—1944 24
Лоренц Рихард (*Lorenz* Richard), 1863—1929 29, 35
Лоренц Хендрик Антон (*Lorentz* Hendrik Antoon), 1853—1928 15, 19, 20, 23, 29, 35, 38, 51, 62, 63, 66, 77, 109, 111—115, 117, 120—124, 126—128, 130, 131, 134, 136, 139, 141, 147, 149, 151, 152, 154—156, 158, 160, 161, 164, 166, 167, 169, 184, 186, 194, 202, 219, 221, 226, 227, 230, 233, 236, 241, 250, 256, 258
Лошмидт Иоганн Йозеф (*Loschmidt* Johann Joseph), 1821—1895 64, 71, 84, 85, 92
Лукреций (*Lucretius*), I в. до н. э. 307
Льюис Гилберт (*Lewis* Gilbert), 1875—1946 390
Лэнгли Самьюэл Пирпонт (*Langley* Samuel Pierpont), 1834—1906 349
Люммер Отто (*Lummer* Otto), 1860—1925 348, 349, 357

Маас Герберт (*Maass* Herbert), 1878—1957 434
Маделунг Эрвин (*Madelung* Erwin), 1881—1972 465
Майер Вальтер (*Mayer* Walther), 1887—1948 319, 334, 431—434, 466, 468, 541
Майкельсон Альберт Абрахам (*Michelson* Albert Abraham), 1852—1931 23, 29, 108, 109, 111—113, 121, 129, 166, 306, 476
Майоль Аристид (*Maillol* Aristide), 1861—1944 306
Маккарти Джозеф (*McCarthy* Joseph), 1908—1957 17
Мак-Кормак Рассел (*McCormmach* Russel), род. 1933 118
Мак-Кулаг Джеймс (*MacCullagh* James), 1809—1847 116
Максвелл Джеймс Клерк • (*Maxwell* James Clerk), 1831—1879 20, 23, 27, 37, 38, 51, 62—64, 68—70, 83, 85, 86, 107, 108, 116, 118, 220, 221, 237, 274, 281, 306—308, 375—377, 385, 444
Мандель Генрих (*Mandel* Heinrich) 316, 318
Мандль Руди (*Mandl* Rudi) 263
Марден Мэри (*Marden* Mary) 434
Марич Зорка (*Maric* Zorka), 1883—1938 287
Марич Милева — *см.* *Эйнштейн* Милева
Марков Андрей Андреевич (старший), 1856—1922 100
Маркони Гульельмо (*Marconi* Guglielmo), 1874—1937 476
Маркс Эрих (*Marx* Erich), 1874—1956 480
Марсе Франсуа (*Marcet* François), 1803—1883 373, 374
Марьянов Дмитрий (*Marianoff* Dimitri) 434, 540
Масарик Томаш Гаррик (*Masaryk* Tomas Garrique), 1850—1937 19, 484
Мах Эрнст • (*Mach* Ernst), 1838—1916 19, 21, 23, 51, 54, 84, 87, 106, 132, 272—278, 306, 315, 476
Мейер Стефан (*Meyer* Stefan), 1872—1949 106, 479, 482
Мейер Эдгар (*Meyer* Edgar), 1879—1960 479, 482
Мейерсон Эмиль (*Meyerson* Emile), 1859—1933 157, 307
Мельхер Хорст (*Melcher* Horst), род. 1927 464
Менг Генрих (*Meng* Heinrich), 1887—1972 485
Менделеев Дмитрий Иванович, 1834—1907 82
Мера Ягдиш (*Mehra* Jagdish) 129
Ми Густав (*Mie* Gustav), 1868—1957 219, 226, 227, 249
Мизес Рихард фон (*Mises* Richard von), 1883—1953 466
Мизнер Чарлз (*Misner* Charles), род. 1932 255
Милл Джон Стюарт (*Mill* John Stuart), 1806—1873 307
Миллер Артур (*Miller* Arthur), род. 1940 117
Миллер Дайтон Кларенс (*Miller* Dayton Clarence), 1886—1941 109, 110, 118
Милликен Роберт Эндрюс (*Millikan* Robert Andrews), 1868—1953 306, 339, 365, 366
Минковский Герман (*Minkowski* Hermann), 1864—1909 51, 119, 148, 149, 156, 159, 186, 221, 224, 264, 273
Миттаг-Леффлер Магнус Густав (*Mittag-Leffler* Magnus Gustaf), 1846—1927 166
Мозенгейль Курт фон (*Mosengeil* Kurt von), 1884—1906 159
Молотов Вячеслав Михайлович, 1890—1986 470
Монтень Мишель (*Montaigne* Michel), 1533—1592 91
Морли Эдвард Уильямс (*Morley* Edward Williams), 1833—1923 29, 109, 112, 121
Моцарт Вольфганг Амадей (*Mozart* Wolfgang Amadeus), 1756—1791 24, 46, 176, 287
Мошковский Александр (*Moszkowski* Alexander), 1851—1934 165, 293
Музиль Роберт (*Musil* Robert), 1880—1942 24
Муссолини Бенито (*Mussolini* Benito), 1883—1945 434
Мюзам Ганс (*Mühsam* Hans), 1876—1957 300, 456, 462, 463
Мюзам Минна (*Mühsam* Minna) 462, 463
Мюниц Мильтон Карл (*Muntz* Milton Karl), род. 1913 255
Мюнц Герман (*Müntz* Hermann) 466

Навон Ицхак (*Navon* Itzhak), род. 1923 18
Нагель Бенгт (*Nagel* Bengt), род. 1927 473
Надольны Рудольф (*Nadolny* Rudolf), 1873—1953 474, 539
Най Мэриджо (*Nye* Maryjo) 102

Натан Отто (*Nathan* Otto), род. 1893 233, 453, 542
Натансон Ладислас (*Natanson* Ladislas), 1864—1937 470
Наунин Бернгард (*Naunyn* Bernhard), 1839—1925 477, 482
Негели Карл фон (*Nägeli* Carl von), 1817—1891 101, 103
Нейман Джон фон (*Neumann* John von), 1903—1957 472
Нейман Франц (*Neumann* Franz), 1798—1895 116
Нернст Герман Вальтер (*Nernst* Hermann Walther), 1864—1941 23, 229, 306, 366, 380, 382, 383, 401, 413, 476, 477, 536, 538
Нетер Амали Эмми (*Noether* Amalie Emmy), 1882—1935 23, 251, 263, 266, 306, 321
Николъс Эрнест Фокс (*Nichols* Ernest Fox), 1869—1924 349
Ниссен Рудольф (*Nissen* Rudolf) 453
Нобль Г. Р. (*Noble* H. R.) 166
Норден Хайнц (*Norden* Heinz), род. 1905 233
Нордстрём Гуннар (*Nordström* Gunnar), 1883—1923 198, 219, 223, 224, 226, 228, 315, 480
Норт Джон (*North* John) 255
Нохель Йегошуа (*Nohel* Yehoshua) 459
Нохель Эмиль (*Nohel* Emil) 185, 459
Ньюком Саймон (*Newcomb* Simon), 1835—1909 246, 306
Ньютон Исаак • (*Newton* Isaac), 1643—1727 20, 22, 23, 37, 64, 127, 186, 193, 231, 233, 273—275, 281, 290, 293, 294, 306, 308, 440, 441, 479, 481

Озеен Карл Вильгельм (*Oseen* Carl Wilhelm), 1879—1944 480, 482, 483
Оппенгейм Пауль (*Oppenheim* Paul), 1885—1977 542
Оппенгеймер Дж. Роберт (*Oppenheimer* J. Robert), 1904—1967 13, 14, 17, 47, 257, 258, 280, 452, 542
Орнштайн Леонард Саломон (*Ornstein* Leonard Salomon), 1880—1941 101, 387, 417, 480
Осецкий Карл фон (*Ossietzky* Carl von), 1889—1938 19, 487, 488, 540
Оствальд Фридрих Вильгельм (*Ostwald* Friedrich Wilhelm), 1853—1932 52, 53, 83, 84, 87, 106, 476, 477, 534

Пайс Абрахам (*Pais* Abraham), род. 1918 175, 321
Пайс Сара (*Pais* Sara), род. 1942 165
Панов Владимир Иванович, род. 1942 210
Пановский Вольфганг (*Panofsky* Wolfgang), род. 1919 151
Парселл Эдвард (*Purcell* Edward), род 1912 151
Паули Вольфганг (*Pauli* Wolfgang), 1900—1958 12, 13, 20, 34, 135, 139, 145, 151, 175, 178, 179, 208, 249, 255, 258, 265, 267, 319, 320, 321, 327, 329, 334, 336, 397, 403, 404, 415, 419, 422, 426, 434, 448, 451, 456, 471
Пашен Фридрих (*Paschen* Friedrich), 1865—1947 348, 349, 351, 477
Пенлеве Поль (*Painlevè* Paul), 1863—1933 157
Пенроуз Роджер (*Penrose* Roger), род. 1931 65
Перрен Жан Батист • (*Perrin* Jean Baptist), 1870—1942 98, 102, 105, 106, 479, 480
Пик Георг (*Pick* Georg), 1859—1942 204
Пикар Огюст (*Piccard* Auguste), 1884—1962 229
Пикассо Пабло (*Picasso* Pablo), 1881—1973 24, 26
Пипкин Френсис (*Pipkin* Francis), род. 1925 440
Планк Макс Карл Эрнст Людвиг • (*Planck* Max Karl Ernst Ludwig), 1858—1947 21, 23, 28, 30, 34—36, 39, 62—64, 72, 78, 83, 102, 116, 141, 145, 146, 147, 156, 159, 184, 196, 229, 231, 232, 270, 274, 299, 303, 306, 307, 340, 344, 348, 350—356, 358, 361, 362, 366—370, 372, 378, 382—384, 386, 391, 392, 410, 420, 426, 445, 452, 473, 476, 477, 479, 480, 482—484, 536, 537, 540
Платон (Plato), 428?—348 до н. э. 54, 255, 307
Подольский Борис (*Podolsky* Boris), 1896—1966 334, 430, 438, 439, 447, 468, 469
Пол Балтазар ван дер (*Pol* Balthasar van der), 1889—1959 291
Поултон Эдвард Бегнел (*Poulton* Edward Bagnall), 1856—1943 482
Праут Уильям (*Prout* William), 1785—1850 83
Прингсгейм Эрнст (*Pringsheim* Ernst), 1859—1917 348, 349, 354, 357, 477

Пти Алексп Терез (*Petit* Alexis Thérèse), 1791—1820 373
Пуанкаре Анри • (*Poincaré* Henri), 1854—1912 15, 29, 35, 37, 54, 67, 96, 111, 117, 118, 125—128, 131, 132, 139, 141, 151, 152, 154—159, 160—167, 258, 269, 476
Пур Чарлз Лейн (*Poor* Charles Lane), 1866—1951 296
Пфеффер Вильгельм (*Pfeffer* Wilhelm), 1845—1920 27, 88, 89
Пьеро делла Франческа (Piero della Francesca), 1420—1492 24

Раби Исидор (*Rabi* Isidor), род. 1898 14, 436, 488
Рамель барон Стен Густав (*Ramel* Baron Sten Gustav), 1872—1947 475
Рамзай Уильям (*Ramsay* William), 1852—1916 101, 103
Рамзауэр Карл (*Ramsauer* Carl), 1879—1955 421
Расин Жан (*Racine* Jean), 1639—1699 54
Рассел Бертран (*Russel* Bertrand), 1872—1970 20, 307, 454, 542
Ратджерс Р. (*Rutgers* R.) 94
Ратенау Вальтер (*Rathenau* Walther), 1867—1922 19, 23, 304, 305, 309, 474, 539
Резерфорд Эрнест (*Rutherford* Ernest), 1871—1937 87, 310, 342, 371, 384, 434
Рейк Теодор (*Reik* Theodor), 1888—1969 24
Рембрандт ван Рейн (*Rembrandt* van Rijn), 1606—1669 24
Ренгер Карл (*Renger* Karl), 1887—? 229
Ренкер Ганс (*Renker* Hans), 1886—1954 229
Рентген Вильгельм Конрад (*Roentgen* Wilhelm Conrad), 1845—1923 99
Реньо Анри Виктор (*Regnault* Henri Victor), 1810—1878 373, 374, 377, 385
Ривз Огюст де ля (*Rive* Auguste de la), 1801—1873 373, 374
Риман Бернхард (*Riemann* Bernhard), 1826—1866 204, 210, 218, 251, 272
Ритц Вальтер (*Ritz* Walter), 1878—1909 457
Ричардсон Оуэн Уилланс (*Richardson* Owen Willans), 1879—1959 237, 238
Риччи-Курбастро Грегорио (*Ricci-Curbastro* Gregorio), 1853—1925 204, 205, 209, 210, 218, 265
Робертсон Говард Перси (*Robertson* Howard Percy), 1903—1961 14
Розен Натан (*Rosen* Nathan), род. 1909 271, 280, 334, 430, 438, 439, 447, 469, 470
Розенфельд Леон (*Rosenfeld* Léon), 1904—1974 12
Розел Альберта (*Rozsel* Alberta) 455
Рондон Кандиду Мариану да Силва (*Rondon* Candido Mariano de Silva), 1865—1958 485
Роттенбург Отто фон (*Rottenburg* Otto von) 475
Рубенс Генрих (*Rubens* Heinrich), 1865—1922 229, 349—351, 357, 366, 536, 538
Рузвельт Франклин Делано (*Roosevelt* Franklin Delano), 1882—1945 19, 309, 435, 436, 464, 541
Рэлей лорд (*Rayleigh* Lord), 1842—1919 74, 84, 105, 106, 109, 350, 357, 358, 377

Сазерленд Уильям (*Sutherland* William), 1859—1911 91, 94
Саймон Френсис (*Simon* Francis), 1893—1956 381, 404
Сакур Отто (*Sackur* Otto), 1880—1914 185, 459
Сведберг Теодор (*Svedberg* Theodor), 1884—1971 479
Секереш Джордж (*Szekeres* George), род. 1911 259
Сен-Джон Чарлз Эдвард (*St. John* Charles Edward), 1857—1935 479
Сербер Роберт (*Serber Robert*), род. 1909 257
Сервантес Мигель де (*Cervantes* Miguel de), 1547—1616 54
Силард (*Сцилард*) Лео (*Szilard* Leo), 1898—1964 300, 452, 463, 464
Ситтер Виллем де (*Sitter* Willem de), 1872—1934 256, 276, 279, 283, 291, 468
Скарлатти Доменико (*Scarlatti* Domenico), 1685—1757 24
Слэтер Джон Кларк (*Slater* John Clarke), 1900—1976 398, 400, 401—403

Смелли Уильям (*Smellie* William), 1740?—1795 79
Смит Говард Кингсбери (*Smith* Howard Kingsbury), род. 1914 450
Смолуховский Мариан Риттер (*Smoluchowski* Marian Ritter), 1872—1917 23, 102, 104—106, 306
Снайдер Хартленд (*Snyder* Hartland), 1913—1962 258, 280
Содди Фредерик (*Soddy* Frederick), 1877—1956 87
Соловин Морис (*Solovine* Maurice), 1875—1958 54, 132, 534
Соломон Жак (*Solomon* Jacques) 319
Софокл (*Sophocles*), 496—406 до н. э. 54
Спиноза Бенедикт де (*Spinoza* Benedict de), 1632—1677 24, 307, 449
Стефан Йозеф (*Stefan* Jozef), 1835—1893 347
Стимсон Генри (*Stimson* Henry), 1867—1950 436
Стокс Джордж Габриэль (*Stokes* George Gabriel), 1819—1903 104, 116
Страус Эрнст Габор (*Straus* Ernst Gabor), род. 1922 202, 206, 253, 335, 470—472
Стройк Дирк (*Struik* Dirk), род. 1894 210, 265, 325
Стьюэр Роджер (*Stuewer* Roger), род. 1934 397
Стэчел Джон (*Stachel* John), род. 1928 424
Схоутен Ян (*Schouten* Jan), 1883—1971 265, 325

Талмуд (Талми) Макс (*Talmud* (Talmey) Max), 1869—1941 46, 533
Таннер Ганс (*Tanner* Hans), 1886—? 179
Тейт Питер Гатри (*Tait* Peter Guthrie), 1831—1901 63
Теске Арми (*Teske* Armi) 103
Тиндаль Джон (*Tyndall* John), 1820—1893 105
Тирринг Вальтер (*Thirring* Walter), род. 1927 443
Тодд Дэвид Пек (*Todd* David Peck), 1855—1939 108
Толмен Ричард Чейс (*Tolman* Richard Chase), 1881—1948 257, 456, 468, 469
Толстой Лев Николаевич, 1828—1910 24
Томас Левелин Хиллет (*Thomas* Llewellyn Hilleth), род. 1903 139
Томсон Джозеф Джон (*Thomson* Joseph John), 1856—1940 84, 87, 145, 152, 153, 292, 295, 342, 354, 363—365, 370
Томсон Джордж Пайджет (*Thomson* George Paget), 1892—1975 486
Томсон Уильям (лорд Кельвин) (*Thomson* William, Lord Kelvin), 1824—1907 27, 63, 85, 109, 116, 306, 377
Торн Кип (*Thorne* Kip), род. 1940 255, 268, 269
Траутман Анджей (*Trautman* Andrzej) 268
Тредер Ханс Юрген (*Treder* Hans-Jurgen), род. 1928 56
Троутон Фредерик (*Trouton* Frederick), 1863—1922 116
Трумэн Гарри (*Truman* Harry), 1884—1972 13

Уилер Джон Арчибальд (*Wheeler* John Archibald), род. 1911 255, 258
Уилкинсон Дэвид (*Wilkinson* David), род. 1935 261
Уилл Клиффорд Мартин (*Will* Clifford Martin), род. 1946 269
Уильямсон Александр(*Williamson* Alexander), 1824—1904 82
Уиттекер Эдмунд Тейлор (*Whittaker* Edmund Taylor), 1873—1956 163
Уленбек Джордж Юджин (*Uhlenbeck* George Eugene), 1900—1974 139, 240, 317, 387, 415, 447
Уокер Джимми (*Walker* Jimmy), 1881—1946 540
Уолкотт Чарльз Дулитл (*Walcott* Charles Doolittle), 1850—1927 480
Уотерстон Джон Джеймс (*Waterston* John James), 1811—1883 375

Фай Эрве (*Faye* Hervé), 1814—1902 245, 346
Фарадей Майкл (*Faraday* Michael), 1791—1867 31, 38, 83, 308
Фейнберг Джералд (*Feinberg* Gerald), род. 1933 142
Ферми Энрико (*Fermi* Enrico), 1901—1954 415, 464
Фёппль Август (*Föppl* August), 1854—1924 51, 130
Фидлер Вильгельм (*Fiedler* Wilhelm), 1832—1912 460

Физо Арман Ипполит Луи (*Fizeau* Armand Hippolyte Louis), 1819—1896 111, 113, 121
Филлипс Мелба (*Phillips* Melba), род. 1907 115
Фицджералд Джордж Фрэнсис (*FitzGerald* George Francis), 1851—1901 29, 112, 117, 119—122, 136
Флекснер Абрахам (*Flexner* Abraham), 1866—1959 431, 434, 466, 468
Флюкигер Макс (*Fluckiger* Max) 56
Фогт Вольдемар (*Voigt* Woldemar), 1850—1919 117—119, 122, 457
Фок Владимир Александрович, 1898—1974 318, 469
Фоккер Адриан Даниэль (*Fokker* Adriaan), 1887—1972 124, 227, 228, 245, 460
Форман Филипп (*Forman* Philipp), 1895—1978 435, 541
Форстер Фридрих Вильгельм (*Forster* Friedrich Wilhelm), 1896—1966 489
Фосс Аурель (*Voss* Aurel), 1845—1931 265
Фра Анжелико (*Fra* Angelico), 1400—1455 24
Франк Дж. (*Franck* J.), 1882—1964 484
Франк Филипп (*Frank* Philipp), 1884—1966 56, 135, 185, 288, 295, 307, 339, 459, 471
Франс Анатоль (*France* Anatole), 1844—1924 24
Франц Иосиф, император (*Franz* Joseph), 1830—1916 134, 535
Фрауэнгласс Уильям (*Frauenglass* William) 451
Фрейд Зигмунд (*Freud* Sigmund), 1856—1939 303, 484, 485, 541
Фрейндлих Эрвин (*Freundlich* Erwin), 1885—1964 246, 290, 294, 300
Френель Огюстен Жан (*Fresnel* Augustin Jean), 1788—1827 107, 114—116, 120
Френкель Эльза (*Frenkel* Elsa), 1888—? 229
Фридман Александр Александрович, 1888—1925 256, 279
Фридман Генрих (*Friedmann* Heinrich) 47
Фюрт Рейнгольд (*Fürth* Reinhold) 101

Хаас Артур (*Haas* Arthur), 1884—1941 479, 480
Хаас Вандер Иоханнес де (*Haas* Wander Johannes de), 1878—1960 236—241, 460, 461, 485
Хаас Гертруда де (урожд. Лоренц) (*Haas* Gertruda, Lorentz) 460, 488
Хаббл Эдвин Пауэлл (*Hubble* Edwin Powell), 1889—1953 31, 256,
Хавас Питер (*Havas* Peter), род. 1916 271, 282, 283
Хант Франклин Ливингстон (*Hunt* Franklin Livingston) 366
Харвард А. Е. (*Harward* A. E.) 265
Харви Томас Стольц (*Harvey* Thomas Stoltz), род. 1912 455
Хвольсон Орест Данилович, 1852—1934 477, 478
Хевисайд Оливер (*Heaviside* Oliver), 1850—1925 120, 220, 476
Хениш Конрад (*Haenisch* Konrad), 1876—1925 538
Херси Джон (*Hersey* John), род. 1914 24
Хиросиге Тетю (*Hirosige* Tetu), 1894—1976 118
Хокинг Стивен Уильям (*Hawking* Stephen William), род. 1924 255, 284
Холдейн Джон Скотт (*Haldane* John Scott), 1860—1936 297
Холтон Джералд (*Holton* Gerald), род. 1922 116
Хопф Людвиг (*Hopf* Ludwig), 1884—1939 180, 181, 185, 204, 205, 393, 458, 459
Хофман Банеш (*Hoffmann* Banesh), род. 1906 56, 282, 334, 470
Хьюз Артур Левелин (*Hughes* Arthur Llewellyn), 1883—1978 365, 366

Цангер Генрих (*Zangger* Heinrich), 1874—1929, 193, 200, 202, 203, 207, 223, 230, 241, 268, 289
Цвейг Стефан (*Zweig* Stefan), 1881—1942 485
Цеппелин Фердинанд (*Zeppelin* Ferdinand), 1838—1917 476
Цернике Фриц (*Zernike* Frits), 1888—1966 387, 417

Чаплин Чарлз Спенсер (*Chaplin* Charles Spencer), 1889—1977 287

Чедвик Джеймс (*Chadwick* James), 1891—1974 311, 342
Черн Шиинг-Шен (*Чжэнь* Шеншень) (*Chern* Shiing-Shen), род. 1911 322
Черчилль Уинстон (*Churchill* Winston), 1874—1965 309, 433

Шама Деннис (*Sciama* Dennis), род. 1926 255, 258
Шапиро Ирвин (*Shapiro* Irwin), род. 1929 261
Шапиро Мейер (*Shapiro* Meyer), род. 1904 24
Шварцшильд Карл (*Schwarzchild* Karl), 1873—1916 23, 247, 306
Шенкланд Роберт (*Shankland* Robert), род. 1908 109, 113
Шефер Клеменс (*Shaefer* Clemens), 1878—1968 477
Шиллер Фридрих (Schiller Friedrich), 1759—1805 445
Шилпп Артур (*Schilpp* Paul Arthur), род. 1897 23, 55
Шмидт-Отт Фридрих (*Schmidt-Ott* Friedrich), 1860—1954 466
Шоке-Брюа Ивонн (*Choquet-Bruhat* Yvonne) 283
Шотки Фридрих Герман (*Schottky* Friedrich Hermann), 1851—1935 60
Шпекер Ганс Эйген (*Specker* Hans Eugen) 56
Шрёдингер Эрвин • (*Schroedinger* Erwin), 1887—1961 28, 33, 66, 256, 267, 317, 332, 333, 335, 344, 400, 403, 416, 420—424, 426, 430, 431, 439, 486, 487
Штарк Иоханнес (*Stark* Johannes), 1874—1957 60, 159, 171, 182, 392, 477
Штерн Альфред (*Stern* Alfred), 1846—1936 50, 201, 396
Штерн Отто (*Stern* Otto), 1888—1969 15, 185, 426, 459, 460, 484, 488
Штреземан Густав (*Stresemann* Gustav), 1878—1929 309
Штумпф Карл (*Stumpf* Karl), 1848—1936 293
Штрэк Карл фон (*Stürgkh* Kalr von), 1859—1916 19
Шуберт Франц (*Schubert* Franz), 1797—1828 24
Шупп Герман (*Schüepp* Hermann), 1884—1971 179

Эбан Аббa (*Eban* Abba), род. 1915 18, 453
Эддингтон Артур Стэнли (*Eddington* Arthur Stanley), 1882—1944 43, 169, 263, 265, 271, 279, 289, 291, 292—294, 303, 322, 328—330, 333, 480, 537
Эдисон Томас Алва (*Edison* Thomas Alva), 1847—1937 23, 306
Эйкен Арнольд (*Eucken* Arnold), 1884—1950 381, 383
Эйнштейн Абрахам (*Einstein* Abraham), 1808—1868 44
Эйнштейн Бернард Цезар (*Einstein* Bernhard Caesar), род. 1930 435, 453, 540, 542
Эйнштейн Ганс Альберт (*Einstein* Hans Albert), 1904—1973 54, 179, 431, 453, 455, 534, 540—542
Эйнштейн Герман (*Einstein* Hermann), 1847—1902 43—45, 48, 50, 52, 54, 533, 537
Эйнштейн Ильзе (*Einstein* Ilse), 1897—1934 56, 286, 432, 434, 470, 475, 537, 539, 541
Эйнштейн Лина (*Einstein* Lina), 1875—1944 19
Эйнштейн Марго (*Einstein* Margot), род. 1899 18, 56, 286, 288, 432, 434, 435, 450, 537, 540, 541
Эйнштейн Мария (Майя) (*Einstein* Maria (Maja)), 1881—1951 44, 45, 55, 177, 288, 434, 450, 533, 535, 537, 541, 542
Эйнштейн (урожд. Марич) Милева (*Einstein* (Maric) Mileva), 1875—1948 16, 52, 54, 179, 180, 184, 185, 230, 285, 287, 453, 474, 534, 542
Эйнштейн (урожд. Кох), Паулина (*Einstein* (Koch) Pauline), 1858—1920 43, 45, 54, 288, 289, 533, 537
Эйнштейн Рудольф (*Einstein* Rudolf) 537
Эйнштейн Томас Мартин (*Einstein* Thomas Martin), род. 1955 542
Эйнштейн (урожд. Кнехт) Фрида (*Einstein* (Knecht) Frida), 1895—1958 435, 540
Эйнштейн Эвелин (*Einstein* Evelyn) 540
Эйнштейн Эдуард (*Einstein* Eduard), 1910—1965 180, 432, 453, 535
Эйнштейн Эльза (*Einstein* Elsa), 1876—1936 286, 288, 434, 435, 462, 474, 537, 539, 540, 541

Эйнштейн Якоб (*Einstein* Jakob), 1850—? 45, 46, 48, 50
Экснер Феликс (*Exner* Felix), 1876—1930 103
Эльерс Юрген (*Ehlers* Jurgen), род. 1929 271, 282, 283
Эльзассер Вальтер (*Elsasser* Walter), род. 1904 421, 422
Эльстер Юлиус (*Elster* Julius), 1854—1920 363
Эмден Роберт (*Emden* Robert), 1862—1940 482
Эпикур (*Epicurus*), 341—270 до н. э. 79
Эпштейн Пауль (*Epstein* Paul), 1871—1939 302
Эренгафт Феликс (*Ehrenhaft* Felix), 1879—1952 482
Эренфест Пауль (*Ehrenfest* Paul), 1880—1933 23, 57, 67, 69, 71, 72, 89, 147, 150, 157, 185, 202, 203, 206—208, 216, 230, 231, 236, 240, 244, 289, 302, 306, 309, 313, 318, 319, 330, 331, 382, 387, 396, 399, 401, 404, 408, 413, 422, 425, 430, 433, 456, 461, 462, 468, 480
Эренфест-Афанасьева Татьяна Алексеевна, 1876—1964 57, 69, 71, 72, 236
Эрман Рудольф (*Ehrmann* Rudolf), 1879—? 454
Этвеш Роланд (*Eötvös* Roland), 1848—1919 60, 198, 209, 476

Юм Дэвид (*Hume* David), 1711—1776 54, 132
Юнг Карл (*Jung* Carl), 1875—1961 458
Юнг Томас (*Young* Thomas), 1773—1829 84
Юри Гарольд (*Urey* Harold), 1893—1981 452

Яффе Георг (*Jaffé* Georg), 1880—1965 480

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрагама теория тяготения 219—227
Абрагама — Эйнштейна дискуссия 226—227
Авогадро закон 89, 97
  расширение 57, 58, 89, 99, 105
Авогадро постоянной методы определения:
  броуновское движение 91—94, 97—99, 102
  Лошмидт 85—86
  переопределение 96—98
  Перрена обзор 102
  Планка закон излучения черного тела 102
  реальность существования молекул 90—98
  современные представления 94
  Эйнштейн 58, 90—94, 97, 99, 102, 105, 358
«Академия Олимпия» 54
Ампера молекулярные токи 236
Аналитическая механика 196
Антисемитизм 178, 302—304
Атомы в отличие от молекул 79—81
Атомистичность вещества, см. Молекул реальность существования
Атомная теория 79—88
Атомное оружие 436, 451, 464
Атомное ядро 310, 311

Баварская академия наук 432
Барнетта эффект 237
Безразмерные константы 43
Бета-излучение 342
Бета-распад 310, 311
Бозе 405—407, 410, 411
  вывод закона Планка 405—407
  прочие упоминания 61, 345, 360, 361, 405—414, 420, 422
Бозе — Эйнштейна газ 413, 414, 420
Бозе — Эйнштейна статистика 420
  Бозе статистика 361, 410, 412
  Больцмана подсчет в отличие от нее 413
  фазовые переходы 415, 416
  хронологии 406, 407
Бозе — Эйнштейна явление конденсации 61, 413, 415—416
  послесловие к нему 416
Больцман:
  вывод закона Дюлонга — Пти 64, 375—376
  Лошмидта влияние на него 64
  Планк 62—63
  реальность существования молекул 84
  стиль письма 69
  термодинамическая вероятность и Больцман 65—69
  толкование закона Дюлонга — Пти 376
  Эйнштейн и Больцман:
    ◇ второй закон термодинамики 76—79
    ◇ статистическая механика 62
    ◇ термодинамическая вероятность 65—69
  Эйнштейна осведомленность о его работах 51, 57, 69, 70
  энтропия и вероятность 27, 62—74
Больцмана подсчет комплексий 66, 76
Больцмана принцип 65, 74—79
  Планком применение 356
  резюме 78
  термин 27, 69
  Эйнштейн и Больцмана принцип 74—79
Больцмана равновесное распределение звезд 276
Больцмана статистический метод 65—69, 74—77, 361, 406
Больцмана теорема равнораспределения 63—64
Большой взрыв 280
Бор, Нильс:
  квантовая теория 36, 344—346
  ◇ вероятностное толкование ее 12
  ◇ дополнительность как толкование ее 426, 439
  ◇ спектры 389
  Нобелевская премия 473, 477
  стационарные орбиты 238
  стиль письма 309, 437
  фотоны, см. *также* Бора — Крамерса — Слэтера предложение:
  ◇ и волны 401—403
  ◇ сопротивление 32—33
  Эйнштейна отношения с ним 398—400
Бора — Зоммерфельда условия 395
Бора — Крамерса — Слэтера (БКС) предложение 398—405, 423
  первый парадокс 401
  второй парадокс 402
  причинность 403—404
  сохранение энергии-импульса 401
  трудности старой квантовой теории 401—404
  Эйнштейн о нем 401
Борн, Макс:
  детерминизм 423—424
  тяготение 206—208
  Эйнштейн о нем 423—424
  Эйнштейна осведомленность о его работах 206—207
Броуновское движение:
  Авогадро постоянная 90—94, 97—99
  Больцман о нем 57
  в XIX в. 95—96
  Гюи о нем 96
  диффузия как марковский процесс 99—100
  Негели — Рамзая возражение 95, 110
  неизмеримость молекул 87—88
  Перрен о нем 98

после 1905 г. 100—102
Пуанкаре о нем 96
реальность существования молекул 95, 102
Смолуховский о нем 103—104
Эйнштейна вклад 27, 58, 89—104
экспериментальное подтверждение 102
Бухерера модель электрона 156
Бьянки тождества 215, 248, 263—266

Вант-Гоффа закон 88—89, 98—99, 101
Вариационный принцип 196, 224, 227, 250—251, 264—265
Вейля теории 314, 325—328
Вероятность, *см. также* Энтропия и вероятность:
Больцмана определение 65, 66, 70
крупно- и мелкозернистая 67
Эйнштейн о ней 65, 66, 70, 79
Эйнштейна определения 74 75
Вещество, *см. также* Молекул реальность существования:
современные представления о фундаментальных составляющих 42
тяготение и структура 244
Вина догадка 348
Вина закон 348, 349, 385, 388
Вина режим 348, 349
Волновая механика 33, 314, 416—420
от де Бройля и Эйнштейна к Шредингеру 420
от де Бройля к Эйнштейну 418—420
от Эйнштейна к де Бройлю 417, 418
появление 417—420
Шрёдингера 424
Волновая функция, термин 460
Волновая функция Шредингера 422, 423, 431
Вращение:
Мах о нем 273
Ньютона аргументация в пользу абсолютного характера вращения 231
Эйнштейн о нем 182, 183
Времениподобный вектор 148
Время 194
измерение 212
инерциальные системы отсчета 135
Лоренц о нем 122, 123, 136, 161
местное 123, 136, 161
общее 122
повседневные ощущения 136
Пуанкаре о нем 124, 126
СТО 134, 135, 148

Галактик перемещения 277
Галилеева инвариантность 135, 136
Галилея преобразования 135
Гаусса теория поверхностей 204
Гейгера — Боте опыт 427
Гейзенберг:
квантовая механика 240, 422, 423
неопределенность 320
неопределенности принцип 425
Нобелевская премия 33, 486, 487
причинность 425
Гей-Люссака закон 81
Геометризации программа 41
Германия и Эйнштейн 299—306
Гиббса работы:
Эйнштейн о них 76
Эйнштейна осведомленность о них 56, 74, 76
Гильберта условие 270

Далекий параллелизм 217, 331
Дальтона химия 79—81
Движение:
абсолютное 127
резонатора в поле излучения 60
сингулярности 280—283
Двойное лучепреломление 116
Детерминизм 423
индетерминизм 424
Джинса закон 386
Дифференциальная геометрия:
относительности и постриманова геометрия 322—327
Эйнштейн и геометрия 51, 204, 205, 448
Диффузия как марковский процесс 99—100
Доплера эффект 118, 150, 313
Дуана — Ханта предел 365
Дюлонга — Пти закон 37, 64, 372—375

Евклидова геометрия 206, 226
Еврей судьба 17, 293, 301—304, 452
Единая теория поля 15, 28, 33
Вейля 314, 324—327
космологическая проблема 315
несимметричный случай 336
отношение к ней 334
первая попытка создания 279
пионеры 314
последнее высказывание Эйнштейна о ней 338
последние уравнения Эйнштейна 337
последовние 338
постриманова дифференциальная геометрия 322—327
предпосылки 309
пятимерные теории 314—322, 445
размышления 314—315
сомнения 448
супероб'единение 41, 42
хронология 327—338
электромагнетизм 31

Жесткие тела 150

Замкнутой системы полная энергия-импульс 268
Зеемана эффект и гиромагнитная аномалия 240

Излучательные переходы, спонтанные и индуцированные 387—389
Излучение, *см. также* Черного тела излучение:
квантовые загадки 400—402
равнораспределения закон 60
Эйнштейна теория 177, 386
Эйнштейном применение статистического подхода 74
Излучения флуктуации 392
Израиль и Эйнштейн 454
предложение поста президента 18, 453
Инерциальные системы отсчета 133, 134
Инерция:
Маха закон 275
Эйнштейн о ней 279
Ионы 117

Искривление лучей света 30, 38—39, 175
Нордстрёма и Эйнштейна — Гроссмана теории 228
обнаружение 186—193
ОТО 38, 39
экспедиции по наблюдению солнечных затмений 256, 262, 289, 290

Калибровочное условие 271
Калибровочные поля локальные неабелевы 41, 42
Калибровочные преобразования 326, 327
Калуцы — Клейна теория 316—321, 334
Эйнштейн о ней 320
Калуцы теория 314—320
Карно принцип 63, 96
Картана — Эйнштейна переписка 218, 332
Квазары 259, 263
Квазистационарный мир 279
Квадрупольная формула 268—271
Квантовая механика 386, 387
и Планк 386
неполнота 439
нерелятивистский вариант 33, 443
полнота 431
релятивистский вариант 41, 443
толкование ее с использованием дополнительности 439
Эйнштейна отклик на ее появление 39, 421—439
Квантовая статистика 405—415
Квантовая теория:
Бора — Эйнштейна диалог о ней 12—13, 426—430
вероятностное толкование 12, 13
взаимодействие излучения и вещества 36
и относительности теория 142, 143
и Планк 36, 37, 344, 351, 355, 367, 368
и Эйнштейн 14—15, 149, 170, 181—183, 188, 271, 308, 312
как революционный процесс 36, 37
классические уравнения движения с неразделяющимися переменными 395
молекулярного газа 61
со статистической механикой связь 57, 77
создание 55
«старая» (1900—1925) 36, 367, 396, 407, 443
твердого тела 340
Эйнштейна вклад 28, 30, 32, 340
Эйнштейна неудовлетворенность ей 393—394
Эйнштейна отношение к ней 441
Квантовая теория поля 33, 443
Квантовая электродинамика 40
Кварки 42
Кинетическая теория газов 82—86
Кирхгофа закон излучения черного тела 346, 347
Классическая механика, *см.* Ньютонова классическая механика
Клаузиуса принцип 63
Клейна теория 314—322
Эйнштейн о ней 319—322
Комитет по интеллектуальному сотрудничеству Лиги Наций 19, 304—305
Комплексный подсчет 66, 67, 75
Комптона эффект 33, 396, 397, 408, 422, 427
Конструктивная теория 35
Корпускулярно-волновой дуализм 28 384—387, 422
Космологический член 279, 315
Космология 256, 272—280, 285
в 1917 г. 280
релятивистская 31, 279
хронология участия Эйнштейна в ее создании 279
Коши задача 283
Красное смещение 169, 173—175, 188—190
Кристоффеля четырехзначковый символ 211
Критическая опалесценция 103—106
Крупнозернистая вероятность 67
Курсуноглу теория 335

Ланде фактор 237
Ланжевена модель электрона 153
Лебедь А 259
Ленсе — Тирринга эффект 275
Лептоны 42
Лоренц:
аберрация света 114, 115
атомистическая теория электромагнетизма 121
Майкельсона — Морли опыт 109, 120, 121, 123
Нобелевская премия 149, 476, 477
о времени 123, 161
о Кауфмане 160
отношение к теории относительности 160, 161
отношения с Эйнштейном 164, 201—202, 260—261
Пуанкаре 125, 128
смерть 164
СТО 117—119
тяготения теория 220, 221, 269
уравнения для электрона 154, 155
Физо опыт 114, 115
Фицджеральда — Лоренца сокращение 162
Фицджеральда статья 121, 122
Фогта работа 118
Эйнштейна осведомленность о его работах 118, 123, 130, 131
электродинамика 117
электромагнитная масса 151—154
эфир 161
Лоренц-инвариантность 134, 140, 222
и ОТО 175
Эйнштейн о ней 140
Лоренц-ковариантность 124
Лоренца группа 128
Лоренца преобразования 117, 120—124
и Пуанкаре 128
и СТО 138, 139
и Эйнштейн 194, 195
Лоренца — Фицджеральда сокращение 162
Лошмидт:
влияние Больцмана на него 64
метод определения постоянной Авогадро 85, 86
о реальности существования молекул 86
Эйнштейна осведомленность о его работах 70

Майкельсон:
Нобелевская премия 111
о Максвелле 108
об эфире 108
отношение к СТО 111
смерть 112
Майкельсона — Морли опыт 29, 107—116
и Миллера результаты 109, 110

и Фицджеральд 119, 120
и Эйнштейн 140, 167, 168
Лармор о нем 120
Лоренц о нем 120, 121
Эйнштейна осведомленность о нем 112—116, 136, 140
Майкельсона — Рэлея переписка 108—109
Максвелл:
векторная теория тяготения 220
второй закон термодинамики 62, 63
гиромагнитные эффекты 237
демоны 63
Майкельсон о нем 108
об энтропии и вероятности 62, 63, 69
об эфире 108
понятие поля 116
реальность существования молекул 82, 87
смерть 108
удельная теплоемкость газов 377
Эйнштейн о нем 307, 443
Эйнштейна осведомленность о его работах 69, 70, 129
Максвелла — Больцмана распределение 63, 76
Максвелла — Лоренца уравнения электродинамики 134
тензорная форма 148
Эйнштейн о них 134, 141
Максвелла электродинамика 116, 117, 175, 280, 309
общековариантная форма 213
свободных полей 368, 369
Эйнштейн о ней 134, 150
Массы-энергии эквивалентность, *см. также* Дифференциальная геометрия: Риманова геометрия 143
Матричная механика 28, 314, 407
Мах:
вращения рассмотрение 273
закон инерции 275
и относительности теория 274
и реальность существования молекул 287, 288
и Эйнштейн 21, 209, 273—280
механика 274, 275
феноменализм 106
философия 274
Маха принцип 274—280
Мезон (пион) 41, 342
Мелкозернистая вероятность 67
Меркурия перигелий 30, 245—247
Механика классическая, *см.* Ньютонова классическая механика
Ми теория тяготения 219, 226, 249, 250
Мировая линия 148
Мировое правительство 300, 451
Молекул размеры 60
Молекул реальность существования 26—27
Авогадро закон 82
Авогадро постоянная 89, 90—98
броуновское движение 95—102
Вант-Гоффа законы 88—89
кинетическая теория 82—86
критическая опалесценция 103—105
Кюри М. о ней 86—87
неидимость молекул 87
неделимость молекул 86—87
осмотическое давление 88
Оствальд о ней 84, 87, 106
оценка размеров молекул 84—85
Праута гипотеза 82
Пфеффера предположение 88
Смолуховский о ней 103—104
Эйнштейна докторская диссертация 88—94
Эйнштейна интерес к проблеме 25—26
Молекулярной связи энергия 145
Моргановская рукопись 137, 170
Мюон 142
Намагничивание, вызываемое вращением 236
Научный метод 20—22
Неделимость вещества 86—87
Нейтрино 311, 343
Нейтрон 343
Нейтронная звезда 268
ядерные и гравитационные силы 257
Ненаблюдаемость атомов 87
Неопределенности (Гейзенберга) принцип 425
Неразличимость 413
Нернста тепловая теорема 380—383, 413
Нётер теорема 251, 263, 266
Нобелевские премии 473—489
Нордстрёма теория тяготения 198, 219, 223—227, 230
Ньютон:
абсолютное пространство 38
закон инерции 275
закон тяготения 243, 246, 292, 309
о вращательном движении 233, 273
ОТО и закон тяготения 196
причинность и закон тяготения, *см. также* Причинность 11, 12
Пуанкаре о законе тяготения 127
СТО и закон тяготения 198
Эйнштейн о нем 22
Ньютона — Пуассона уравнение 214, 244, 276
Ньютонов предел, затруднения Гроссмана при его получении 213, 215
Ньютонова классическая механика 196
и теории относительности 157
Эйнштейн о ней 440—441
Ньютоновой бесконечности проблема 276, 277
Образование извилин в руслах рек 314
Объективная реальность 437—440, 444
Одновременность 125
определение 173
понятие 137, 138
Пуанкаре о ней 125
Эйнштейна подход к проблеме 173
Оппенгеймера дело 13, 17—18, 452
Оппенгеймера — Волкова предел 258
Осмотическое давление и реальность существования молекул 88
Остронаправленное излучение 414
Относительности теория, *см. также* Относительности общая теория; Относительности специальная теория:
и Мах 274
и ньютонова механика 157
и Уиттекер 163
как новый способ мышления 157—158
как переходное явление 38, 39
международные конференции 157, 258—259, 279, 283
популярное изложение 261
экспериментальные подтверждения со справедливости на 1979 г., GR9 250
Относительности общая теория, *см. также* Тяготение 15, 23, 28—31, 253—284, 432—440
Бьянки тождества 263—266
гравитационное красное смещение 172, 173
гравитационные волны 173
и космология, *см. также* Космология 272—280

и лоренц-инвариантность 176
и Максвелла уравнения 173
искривление лучей света 39, 175
и структура звезд 258
координатные условия 218
красное смещение 188—190
механики уравнения 195
после Эйнштейна 259
последние шаги к ней 241—249
предсказания 262—263
тензоры 211, 212
«три успеха» 260—263
Эйнштейна — Гроссмана сотрудничество и ее разработке 200—217
эквивалентности принцип 171—172
экспедиции по наблюдению солнечных затмений 256, 262
энергии и импульса сохранение 263—268
энергия тяготения 171—174
Относительности специальная теория 23, 25, 28, 29—31, 132—155, 254
влияние на современную физику 151
и время 133
и квантовая теория 142—143, 146
и Лармор 119, 124
и Лоренц 117—124
и Майкельсона — Морли опыт 111—116
и Максвелла теория электромагнетизма 116—117
и ньютонова теория тяготения 170—174
и Планк 35—36
и Пуанкаре 117, 124—128
и Фицджеральд 119—120
и Фогт 118—119
и эфир 132
и эфира динамика 115—116
июнь 1905 г., создание 132—143
Майкельсона отношение к ней 111
массы-энергии эквивалентность 143—145
Минковского вклад 148—149
Минковского отношение к ней 148—149
непостоянство скорости света 220
первые отклики 145—149
переход к ОТО 150
после 1905 г. 149—151
постулаты 135—136
предшественники 116—126
предыстория 107—132
приложения 139—142
простота 132—134
тензорные методы 148
электромагнитная масса 151—157
эстетические корни 132

Патентное бюро в Берне 34, 53—55, 177, 280, 454
Патентные заявки 25, 456
Пацифизм, отношение к нему Эйнштейна 18, 19, 232, 233, 299, 301, 487
Первая мировая война 232, 233
Перрен:
броуновское движение 102
Нобелевская премия 480
Пион (мезон) 41, 342
Планк:
Больцмана влияние на него 62—63
и квантовая механика 386
и квантовая теория, см. Квантовая теория
и реальность существования молекул 83
и Рэлея — Джинса закон 357, 358
и световые кванты 368
и СТО 146
и удельная теплоемкость при низких температурах 382
и Эйнштейн 34, 72
Нобелевская премия 355, 473, 476, 477
о Больцмана принципе 356
относительности теория, первая статья 146
применение теории относительности к квантовой теории 147
причинность 445
экспериментальное подтверждение и принятие идей 370
Планка закон излучения черного тела 34, 36, 340, 349—359
Боте новый вывод 405, 409
Дебая вывод 420
Эйнштейн о нем 356—358, 361, 378, 379
Эйнштейна вывод 28, 388, 389
Планка постоянная 62, 147
Плотность, мелко- и крупнозернистая 67
Поверхностей жидкостей термодинамика 59
Позитрон 343
Полувекторы 433
Пондеромоторная сила в магнитном поле 151
Праута закон 145
Причинность 12, 22—23, 28
Гейзенберг о ней 425
и квантовая теория 12
и спонтанное излучение 400—402
и эксперимент 404
Планк о ней 445
Шредингер о ней 424
Эйнштейн и проблема 404
Пространство 30, 193—195
абсолютное 274
в Маха механике 273, 274
евклидово 227
измерение 212
и СТО 148
пределы 296
римново 319
Протон 342
Пуанкаре:
и 1905 г. 126—128
и броуновское движение 96
и Карно принцип 96
и ковариантность электродинамики 126
и Лоренц 125—128, 163—164
и Лоренца преобразования 128
и СТО 126—128
и тяготение 127, 221, 269
и Эйнштейн 164—167
об одновременности 125
Эйнштейна осведомленность о его работах 131—132, 159—160
электромагнитная масса 154—155
эфир 125—126
Пульсары 271, 272
Пфеффера предположение 88

Равнораспределения закон 377—379
Больцмана 62
классической статистической механики 37
Радиационного равновесия квантовая теория 313
Радиоактивных веществ превращения 145, 394
Радиогалактика 259
Расширяющаяся Вселенная 257

Резерфорда закон радиоактивного распада 394
Рентгеновское излучение:
источники 259
открытие 298
Ридберга постоянная 36, 370
Римана — Кристоффеля тензор 211, 227 267
Римановы геометрия 202—205, 337—340
Римановo пространство 325
Риччи исчисление 265
Риччи тензор 323—324
Рубенса — Курлбаума статья 349
Рэлея — Джинса закон 385
Рэлея рассеяние 105
Рэлея — Эйнштейна — Джинса закон 372

Сазерленда — Эйнштейна соотношение 94
Самоиндукция 128—129
Сверхновые 268
Света аберрация 114—116
Света рассеяние классические теории 396—397
Света эмиссия каналовыми лучами 314
Световые кванты, *см. также* Фотоны 25, 27, 32, 346—349
Вильсона камеры метод 364
Дуана — Ханта предел 365—366
импульса свойства 389—391
как частицы 385
Комптона эффект и доказательство существования 396—397
Лоренц о них 368
парадокс 344
Планк о них 355—358, 361, 368
реакция на них 339, 340, 344, 366—370
реальность 393—394
Рэлея — Джинса закон 356—357
эвристический принцип 360—361, 365
эвристического принципа формулировка 361
Эйнштейна осмотрительное отношение к ним 366—367, 393—394
Эйнштейном открытие 78—79
экспериментальные свидетельства существования 369—370
Связности:
несимметричные 326
теории 325—326
Сильные взаимодействия 42, 312
Сингулярности 41
и гравитационный коллапс 41
и проблема движения 280—283
Шварцшильда 280
Скорость света 126, 132, 161, 190—192, 194, 220
Скрытая переменная, термин 439
Сокращения гипотеза 136
Сольвеевские конгрессы 258, 399, 401, 426—429
Сохранения законы, *см. также* Энергия-импульса сохранение 125, 187, 213, 248, 263—265, 327
импульса 125
и фотоны 414—415
невыполнение 399—400, 407, 411
Спина значение 447
Спонтанные излучательные переходы 387—389, 394
Статистическая зависимость 413
Статистическая механика:
Больцмана, равнораспределения закон 62
основы 60
равнораспределения закон классический 37
связь с квантовой теорией 39
феноменологический подход Эйнштейна 62
Эйнштейна о ней 62
Статистическая физика:
молекулярные основы 27—28
Эйнштейна вклад 56—62
энтропия и вероятность, *см.* Энтропия и вероятность
Статистические законы 39
Стефана — Больцмана закон 73, 347—348
Стокса закон 93, 98
Супергравитация 338

Тахионы 142
Твердого тела квантовая теория 60
Тензорное исчисление и риманова геометрия 210—213
Тензоры:
в ОТО 209—215
и СТО 148
Теории гравитационного поля 218—227
Абрагама 219—226
Лоренца 220—221
Максвелла векторная 220—221
Ми 219, 226
Нордстрёма 219, 223—226
различные 220
скалярные 225—226
Эйнштейна — Гроссмана 233
эквивалентности принцип 225—226
Термодинамика:
Больцмана толкование 103
второй закон 27, 63—67, 82,96
первого закона установление 63
поверхностей жидкостей 59
релятивистская 60
третий закон 381, 413—414
фотохимических процессов 61
Эйнштейн о ней 57—58, 72—73
Эйнштейн о третьем законе 413—414
Эйнштейна доказательство второго закона для необратимых процессов 70—71
Эйнштейна формулировка второго закона 71
Термодинамической вероятности определение 65—69
Тиндаля явление 105
Томаса множитель 139
Троутона — Нобля опыт 116
Тяготение:
вариационный принцип 250, 263—264
и Максвелла уравнения 175
и структура вещества 250
Лоренц о нем 269
Нордстрём о нем 219, 224—227
общековариантность 213—216
Пуанкаре о нем 127, 269
Тяготение и Эйнштейн: 169—175
$E = mc^2$ для гравитационной массы 175
искривление лучей света 175, 186—192
красное смещение 188—190
Максвелла уравнения 173, 175
общековариантность 214—217
ранние статьи 194—197, 198—200
эквивалентности принцип 170—172, 187—188, 190
энергия тяготения 199

Удельная теплоемкость 60, 194, 340, 371—383
ее аномальные свойства для алмаза 372—374

газов 376—378
Нернста работа 381—384
при низких температурах 380—381, 384
твердых тел 36, 382—383
Эйнштейн о ней 378—381, 383, 384
Универсальная молекулярная сила 59, 72
Уравнения гравитационного поля 214, 228—235, 241—254
и вариационный принцип 263, 264
и Гильберт 263, 264
и Ньютона закон 244, 246
общековариантность 242—245
перигелий Меркурия 245—246
4 ноября 1915 г. 242—244
11 ноября 1915 г. 244—245
18 ноября 1915 г. 245—248
25 ноября 1915 г. 248—249

Феноменализм и Эйнштейн 21
Ферми — Дирака статистика 415
Ферромагнетизм 235—240
Физики частиц история 341—344
Физо опыт 114—116
и Лауэ 146
и Лоренц 121
и Пуанкаре 125
и Эйнштейн 114—116, 133, 140
Фицджеральда — Лоренца сокращение 119—122
Флуктуаций теория, *см. также* Энергии флуктуации 56, 73—74, 417—418
Фогта преобразования 118—119
Фотон, *см. также* Бора — Крамерса — Слатера предложение 33, 340—341, 345, 384—398
Бор о нем 402—404
и волны 402—404
и импульса флуктуации 392—393
и Комптона эффект 396—398
и корпускулярная картина 389—390
и световой квант 389—390
и случайность 393—395
и спонтанные и индуцированные переходы 387—389
несохранение числа 407, 411, 414—415
свойства 389
сопротивление идее 339, 344, 366—370, 398—405
термин 390
условие направленности вылета 393
Эйнштейн о нем 364—365, 393—395, 414—415
Фотона спин 408
Фотохимических процессов термодинамика 61
Фотоэлектрический эффект 25, 36, 339 361—366
Френеля гипотеза эфира 114
Френеля коэффициент увлечения 115
Фридмана Вселенная 65, 283
Фуко маятник 273
Фундаментальная теория 35

Хаббла закон 256
Хокинга излучение 284

Центробежных сил поле 233—234

Часов парадокс 141
Частицы:
в 20-е гг. 309—313
новые 40—41
Черного тела излучение, *см. также* Планка закон излучения черного тела 34, 36, 342
Вина закон 348—351, 385, 388, 391
история с 1859 по 1926 г. 346—355
как задача теоретической физики 36
Кирхгофа закон 34, 346—348
Люммер и Прингсгейм о нем 348, 349
Никольс о нем 349
новый вывод 58
Пашена опыт 348—349
Планк о нем, *см. также* Планка закон излучения черного тела 340
Рубенс о нем 349, 351
Рубенса — Курлбаума статья 349
◇ и световые кванты 346—361
Стефана — Больцмана закон 348
Эйнштейн о нем 28, 384—387
энергия флуктуаций 28
Черные дыры 258—259, 268

Шварцшильда решение 259, 280
Шварцшильда сингулярность 280
Шрёдингер:
волновая механика 416, 420—421, 425
волновая функция 422—423, 431
Нобелевская премия 33, 485
причинность 424
Штерна — Герлаха опыт 313

Эддингтон и единые теории поля 328—330
Эйнштейна — Бозе явление конденсации 61, 411—413, 415—416
Эйнштейна Вселенная 277
Эйнштейна — де Хааза эффект 235—241
Эйнштейна — Майера теория 319, 320
Эйнштейна — Подольского — Розена аргументация 438—439
Эйнштейна — Ричардсона эффект 237
Эквивалентности принцип 171—173, 187—188, 195—197, 207, 212
Экспедиции по наблюдению солнечных затмений 256, 262, 289—290
Электромагнетизм:
и единая теория поля 31, 32
и ковариантность 127, 140, 141
интерес Эйнштейна до 1905 г. 128—131
Лоренц о нем 120—124
Максвелла теория 116—117
механическое представление 132
свободные поля и взаимодействия 368—369
Электромагнитная масса 151—157, 160
Лоренц о ней 160
Электромагнитное поле и гравитационное поле 195—197
Электрон 117, 341—342
Электрона спин 408—446
Эмпирический подход 20
Энергии-импульса псевдотензор, 267, 286
Энергии-импульса сохранение 213, 248, 263—268, 400, 404
экспериментальное подтверждение 404—405

Энергии флуктуации 28, 60—61, 384—378, 400
Энергия связи 145
Энтропия, термин 63
Энтропия и вероятность, *см. также* Термодинамики второй закон 56—78
Больцман о них 62—76
до 1905 г. 62, 69—74
Максвелл о них 62—64, 69—71
определение термодинамической вероятности 65—68
статистический характер 63—64
Эйнштейна вклад в рассмотрение вопросов 56—62
Эргодическая теория 72
Этвеша опыт 198, 209, 210, 226
Эфир, *см. также* Майкельсона — Морли опыт 28
аберрация света 114, 116
и Герц 117
и Лармор 124
и Лоренц 160—161
и Майкельсон 108—109
и Максвелл 107—108, 116, 117
и Пуанкаре 125—126
и СТО 112
исторические сведения 107
и Эйнштейн 128—129
обзор теорий 107, 108
определения 107
Френеля гипотеза 121
Эфирный ветер 112, 135
ненулевой 110

Юпитера эффект 107—108

Ядерная физика 145, 310
Ядерной связи энергия 311

ОГЛАВЛЕНИЕ

(Разделы, названия которых выделены курсивом,— почти полностью биографические)

Предисловие научного редактора перевода 5
Предисловие к русскому изданию 8
К читателю 9

Часть I. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Глава 1. *Цель и план* 11

Глава 2. Теория относительности и квантовая теория 34
§ 2.1. Упорядоченные переходы и революционные периоды 34
§ 2.2. Обращение к будущим физикам 40

Глава 3. *Портрет физика в молодости* 43

Часть II. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Глава 4. Энтропия и вероятность 57
§ 4.1. Кратко о вкладе Эйнштейна 57
§ 4.2. Максвелл и Больцман 62
§ 4.3. Прелюдия к 1905 г. 69
§ 4.4. Эйнштейн и принцип Больцмана 74

Глава 5. Реальность существования молекул 79
§ 5.1. Кратко о XIX столетии 79
Химия (79).— Кинетическая теория (82).— Конец неделимости (86).— Конец невидимости (87)
§ 5.2. Горшки Пфеффера и законы Вант-Гоффа 88
§ 5.3. Докторская диссертация 90
§ 5.4. Одиннадцать дней спустя: броуновское движение . . . 95
Некоторые дополнительные сведения из истории физики XIX в. (95).— Переопределение N (96).— Первая статья Эйнштейна о броуновском движении (98).— Диффузия как марковский процесс (99).— Следующие статьи (100)
§ 5.5. Эйнштейн и Смолуховский. Критическая опалесценция 103

Часть III. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 6. «Творец изощрен...» 107
§ 6.1. Эксперимент Майкельсона — Морли 107
§ 6.2. Предшественники 116
Что знал Эйнштейн (116).— Фогт (118).— Фицджеральд (119).— Лоренц (120).— Лармор (124).— Пуанкаре (124)
§ 6.3. Пуанкаре в 1905 г. 126
§ 6.4. Эйнштейн до 1905 г. 128
Эссе, написанное в Павии (129).— Вопрос, поставленный в

Аарау (129).— Студент политехникума (130).— Письмо, написанное в Винтертуре (130).— Лекция, прочитанная в Берне (130).— Выступление в Киото (131).— Резюме (131)

Глава 7. Новая кинематика 132
§ 7.1. Июнь 1905 г.: формулировка СТО, вывод преобразований Лоренца 132
Эстетические корни теории относительности (132).— Два постулата (135).— От постулатов к преобразованиям Лоренца (138).— Приложения (139).— Теория относительности и квантовая теория (142).— «Я мог бы сказать это проще...» (143)
§ 7.2. Сентябрь 1905 г. О выражении $E = mc^2$ 143
§ 7.3. Первые отклики 145
§ 7.4. Эйнштейн и СТО после 1905 г. 149
§ 7.5. Электромагнитная масса: первое столетие 151

Глава 8. Грань истории 157
Новый метод мышления (157).— Эйнштейн и научная литература (159).— Лоренц и эфир (160).— Пуанкаре и третья гипотеза (162).— Уиттекер и история теории относительности (163).— Лоренц и Пуанкаре (163).— Лоренц и Эйнштейн (164).— Пуанкаре и Эйнштейн (164).— Кода: опыт Майкельсона — Морли (167)

Часть IV. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 9. «Счастливейшая мысль в моей жизни...» 169

Глава 10. Профессор Эйнштейн 176
§ 10.1. *Из Берна в Цюрих* 176
§ 10.2. Три с половиной года молчания 180

Глава 11. Статьи, написанные в Праге 183
§ 11.1. *Из Цюриха в Прагу* 183
§ 11.2. 1911 г.: можно ли обнаружить искривление лучей света? 186
Принцип эквивалентности (187).— Тяжесть энергии; красное смещение (188).— Искривление лучей света (190)
§ 11.3. 1912 г.: Эйнштейн на ничьей земле 193

Глава 12. Сотрудничество Эйнштейна с Гроссманом 200
§ 12.1. *Из Праги в Цюрих* 200
§ 12.2. От скаляра к тензору 202
§ 12.3. Сотрудничество 209
§ 12.4. Камень преткновения 214
§ 12.5. Последствия 217

Глава 13. Теории гравитационного поля: первые 50 лет 218
§ 13.1. Эйнштейн в Вене 218
§ 13.2. Статья Эйнштейна — Фоккера 227

Глава 14. Уравнения гравитационного поля 228
§ 14.1. *Из Цюриха в Берлин* 228
§ 14.2. Интерлюдия: вращающий момент, вызываемый намагничиванием 235
§ 14.3. Завершающие шаги 241
Кризис (241).— Четвертое ноября (242).— Одиннадцатое ноября (244).— Восемнадцатое ноября (245).— Двадцать пятое ноября (248)
§ 14.4. Эйнштейн и Гильберт 249

Глава 15. Новая динамика 254
§ 15.1. С 1915 по 1980 г. 254
§ 15.2. «Три успеха» 260
§ 15.3. Законы сохранения энергии-импульса; тождества Бьянки 263

§ 15.4. Гравитационные волны 268
§ 15.5. Космология 272
Эйнштейн и Мах (272).— Эйнштейн и принцип Маха (274)
§ 15.6. Сингулярности; проблема движения 280
§ 15.7. Еще немного о GR9 283

Часть V. ДАЛЬНЕЙШИЙ ПУТЬ

Глава 16. *«Внезапная слава доктора Эйнштейна»* 285
§ 16.1. *Болезнь, новый брак, смерть матери* 285
§ 16.2. *Канонизация Эйнштейна* 289
§ 16.3. *Рождение легенды* 293
§ 16.4. *Эйнштейн и Германия* 299
§ 16.5. *Дальнейшие работы* 306
Деятель культуры (306).— Деятель науки (308)

Глава 17. Единая теория поля 309
§ 17.1. Физика частиц и полей в 20-е годы 309
§ 17.2. Еще одно десятилетие размышлений 313
§ 17.3. Пятое измерение 314
Калуца и Оскар Клейн (314).— Эйнштейн и теория Калуцы — Клейна (318).— Дополнения (320).— Два варианта (322)
§ 17.4. Теория относительности и постриманова дифференциальная геометрия 322
§ 17.5. Дальнейший путь: хронология научных работ 327
§ 17.6. Постскриптум к объединению, прелюдия к квантовой теории 338

Часть VI. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Глава 18. Предварительные замечания 339
§ 18.1. Обзор работ Эйнштейна 339
§ 18.2. Физика частиц: первые 50 лет 341
§ 18.3. Квантовая теория: линии влияния 344

Глава 19. Световые кванты 346
§ 19.1. От Кирхгофа к Планку 346
§ 19.2. Эйнштейн о Планке: 1905 г. Закон Рэлея — Эйнштейна — Джинса 355
§ 19.3. Гипотеза световых квантов и эвристический принцип 359
§ 19.4. Эйнштейн о Планке: 1906 г. 361
§ 19.5. Фотоэлектрический эффект: второе «явление» h . . . 362
1887 г.: Герц (363).— 1888 г.: Гальвакс (364).— 1899 г.: Дж. Дж. Томсон (364).— 1902 г.: Ленард (364).— 1905 г.: Эйнштейн (364).— 1915 г.: Милликен; предел Дуэна — Ханта (365)
§ 19.6. Отклики на гипотезу световых квантов 366
Осмотрительность Эйнштейна (367).— Электромагнетизм: свободные поля и взаимодействия (368).— Влияние эксперимента (369)

Глава 20. Эйнштейн и удельная теплоемкость 371
§ 20.1. Теория удельной теплоемкости XIX в. 371
§ 20.2. Эйнштейн 378
§ 20.3. Нернст: первый Сольвеевский конгресс 381

Глава 21. Фотон 384
§ 21.1. Слияние частиц с волнами и судьба Эйнштейна . . . 384
§ 21.2. Спонтанные и индуцированные излучательные переходы 387
§ 21.3. Завершение построения корпускулярной картины . . . 389
Световые кванты и фотон (389).— Флуктуации импульса: 1909 г. (391).— Флуктуации импульса: 1916 г. (392)

§ 21.4. Первые признаки озабоченности вторжением случая 393
§ 21.5. Отступление: квантовые условия для классических уравнений движения с неразделяющимися переменными . . . 395
§ 21.6. Эффект Комптона 396

Глава 22. Интерлюдия: предложение Бора — Крамерса — Слэтера 398
Первый парадокс (401).— Второй парадокс (402).— Экспериментальное решение проблемы причинности (404).— Экспериментальное решение проблемы сохранения энергии-импульса (404)

Глава 23. Распад единства: рождение квантовой статистики . . . 405
§ 23.1. От Больцмана к Дираку 405
§ 23.2. Бозе 407
§ 23.3. Эйнштейн 411
§ 23.4. Послесловие к конденсации Бозе — Эйнштейна . . . 415

Глава 24. Эйнштейн в переходный период: рождение волновой механики 416
§ 24.1. От Эйнштейна к де Бройлю 417
§ 24.2. От де Бройля к Эйнштейну 418
§ 24.3. От де Бройля и Эйнштейна к Шрёдингеру 420

Глава 25. Отклик Эйнштейна на новую динамику 421
§ 25.1. 1925—1931 гг.: начало спора 421
§ 25.2. *Эйнштейн в Принстоне* 431
§ 25.3. Эйнштейн и объективная реальность 437

Глава 26. Научное мировоззрение Эйнштейна 440
§ 26.1. Эйнштейн, Ньютон и успех 440
§ 26.2. Теория относительности и квантовая теория 443
§ 26.3. Сверхпричинность 444

Часть VII. КОНЕЦ ПУТИ

Глава 27. *Последнее десятилетие* 450
Эпилог 455

Часть VIII. ДОПОЛНЕНИЯ

Глава 28. *О тензорах, слуховом аппарате и многих других вещах: сотрудники Эйнштейна* 456

Глава 29. *Как Эйнштейн получил Нобелевскую премию* 473

Глава 30. *О тех, кому Эйнштейн предлагал присудить Нобелевскую премию* 483

Список литературы 490

Основные даты жизни Эйнштейна 533

Именной указатель 543

Предметный указатель 556

Научное издание

ПАЙС Абрахам

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
И ЖИЗНЬ АЛЬБЕРТА ЭЙНШТЕЙНА

Заведующий редакцией *Н. А. Носова*
Редактор *Е. В. Сатарова*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *С. Я. Шкляр*
Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ № 41014

Сдано в набор 04.05.88. Подписано к печати 13.03.89. Формат 60×90/16. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 36. Усл. кр.-отт. 36. Уч.-изд. л. 42,78. Тираж 36 500 экз. Заказ № 189. Цена 3 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Четвертая типография издательства «Наука»
630077 г. Новосибирск, 77, Станиславского, 25