

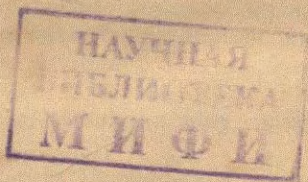
А. ЭДДИНГТОН

Дар
СУВОРОВА С.Г.

Заместитель
главного редактора журнала
«Успехи физики»

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И КВАНТЫ

Перевод с английского
С. Н. Шубина
под редакцией
проф. Б. М. Гессена



Государственное
Технико-теоретическое издательство
Москва 1933 Ленинград

THE NATURE

OF THE

PHYSICAL WORLD

by

A. S. EDDINGTON

Всего - 1 тиз
4РР - 1 тиз

CAMBRIDGE
AT THE UNIVERSITY PRESS
1 9 2 8

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Книга Эддингтона „О природе физического мира“, отрывки из которой мы издаем, появилась, как курс гиффордовых лекций в Эдинбургском университете.

В ряде университетов Англии и Америки существуют специальные фонды (фонд Гиффорда, фонд Силлимана в Иельском колледже), на средства которых каждый год приглашается для чтения курса лекций один из самых выдающихся ученых Англии или Европы.

Задача этих курсов состоит в том, чтобы показать, что наука и религия не только не противоречат друг другу, а наоборот, развитие естествознания подтверждает „необходимость религии и мудрость творца“.

Традиции подобных фондов восходят к XVII в. Роберт Бойль в 1692 г. завещал капитал для того, чтобы каждый год читались 8 лекций, в которых, опираясь на естественно-научный материал, „излагались бы доводы неопровержимости христианства и опровергалось бы неверие“. Бентли был первым лектором фонда Бойля, и в деле „естественно-научного“ опровержения материализма ему помогал советами Ньютон.

Все лекторы фонда Гиффорда в большей или меньшей степени следуют традициям Бентли. Следует этой традиции и Эддингтон. В целом его книга является ярким образчиком квазинаучной апологетики идеализма.

Мировоззрение Эддингтона не отличается большой последовательностью: у него причудливо переплетаются идеалистические направления разных оттенков

вплоть до мистицизма с рядом материалистических высказываний. В общем Эддингтон стоит на позиции крайнего агностицизма, но агностицизма весьма непоследовательного. Последовательность и продуманность в его философских высказываниях часто заменяется блестящими остротами и метафорами.

Но как крупный ученый Эддингтон в изложении конкретного физического материала дает весьма много ценного, а его блестящая манера изложения, соединенная с большой изобретательностью в примерах, делает его книги, особенно популярные, ценными пособиями для усвоения наиболее трудных отделов современной физики.

Исходя из этого, издательство решило предложить советскому читателю избранные места из лекций Эддингтона, излагающие физическое содержание теории относительности и теории квант.

Из книги были устранены не только места, излагающие философские взгляды Эддингтона, но и ряд абзацев, представляющих философские экскурсы, мало связанные с излагаемым физическим материалом.

Общая философская позиция Эддингтона все же не совсем стерлась и в физическом материале. Так, например, при изложении общей теории относительности недостаточно подчеркнута та роль, которую играет материя, особенно в связи с трактовкой принципа эквивалентности.

У Эддингтона это не случайно, так как вслед за изложением общей теории тяготения у него в книге следует специальная глава, опущенная в настоящем издании и дающая „объяснение тяготения“ с точки зрения Эддингтона. В этом вопросе Эддингтон расходится с Эйнштейном и скорее примыкает к Уайтхеду.

Несмотря на ряд интересных мыслей, эта глава настолько спорна и настолько проникнута духом философского релятивизма, что мы сочли необходимым ее опустить.

В проблеме эфира и пустого пространства, в проблеме относительного и абсолютного в применении к пространству и времени Эддингтон высказывает ряд положений, близких к материализму, что не мешает ему в общих гносеологических проблемах занимать позиции крайнего релятивизма.

Очень живое и интересное изложение теории квантов и квантовой механики сейчас немного устарело (лекции Эддингтона были прочитаны в 1927 г.), но все же сохраняют свой интерес и хороши для первоначального ознакомления с кругом идей теории квантов.

Принимая во внимание почти полное отсутствие на нашем книжном рынке популярной литературы по теории относительности и теории квантов, издательство сочло возможным, несмотря на все указанные выше недостатки, издать предлагаемую книгу Эддингтона.

Глава I. КРАХ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

СТРУКТУРА АТОМА

В 1905—1908 гг. Эйнштейн и Минковский подвергли пересмотру самые основы наших представлений о времени и пространстве. В 1911 г. Резерфорд внес наиболее существенное со времен Демокрита изменение в наше представление о материи. Любопытно, что эти два открытия были встречены совершенно по-разному. Новые идеи о пространстве и времени всеми воспринимались как нечто революционное; одни отнеслись к ним с горячим сочувствием, другие—с резкой враждебностью. Новые же представления о материи проделали обычный путь научных открытий—справедливость их обнаружилась постепенно, и по мере накопления опытных подтверждений старая теория спокойно вытеснялась новой. Никто не почувствовал внезапного удара. И все же, прислушиваясь к протестам против большевизма современной науки и к сожалениям о старом добром порядке, я склонен думать, что истинным злодеем в этой драме является не Эйнштейн, а Резерфорд. Разница между современными и прежними представлениями о вселенной заключается не столько в перестройке понятий пространства и времени, произведенной Эйнштейном, сколько в том, что все, считавшееся наиболее прочным, теперь рассматривается как совокупность крошечных сгустков, движущихся в пустоте. Это последнее обстоятельство

особенно сильно бьет по тем, которые думают, что истинная природа вещей более или менее соответствует их внешнему виду. Существование внутриатомной пустоты, установленное современной физикой, имеет еще большее значение, чем существование открытой астрономией межзвездной пустоты.

Атом так же пуст, как солнечная система. Если бы в человеческом теле не было пустот и его протоны и электроны собрались в одну массу, то от человека остался бы комочек, едва различимый в увеличительное стекло.

Эта пористость материи была неизвестна прежней атомной теории. Правда, и тогда знали, что в газах, например в воздухе, атомы находятся на больших расстояниях друг от друга и оставляют большую часть занятого газом пространства пустым. Но при этом считалось, что только те тела содержат сравнительно небольшое количество материи, которые по своим характерным свойствам похожи на воздух. „Воздушное ничто“ было обычным выражением для обозначения невещественного. В твердых же телах атомы находятся близко друг к другу, так что прежняя атомная теория в согласии с обычными представлениями считала твердые тела плотно заполненными веществом без сколько-нибудь значительных промежутков.

Возникшая в конце XIX столетия электрическая теория материи сперва стояла на той же точке зрения. Было известно, что отрицательное электричество состоит из элементарных зарядов очень небольшого размера. Но зато считалось, что другая составная часть материи — положительное электричество — распределена по сфере, размеры которой совпадают с размерами атома и внутри которой плавают крошечные отрицательные электроны. Таким образом и эта теория считала, что большая часть пространства внутри твердого тела является заполненной.

В 1911 г. Резерфорд впервые показал, что положительное электричество тоже сконцентрировано в крошечных комочках. Его опыты с рассеянием α -частиц показали, что атом является источником таких больших электрических сил, существование которых возможно только при громадных концентрациях положительного электричества. Размеры этого положительного ядра должны быть ничтожны по сравнению с размерами атома. Таким образом впервые было признано, что большая часть объема атома ничем не заполнена и что атомная система не похожа на вещественный „бильярдный шар“, а по типу скорее совпадает с „солнечной системой“. Через три года после этого на основании резерфоровской модели Нильс Бор развил свою знаменитую теорию, и начался ряд быстрых успехов в этом направлении. Как бы ни менялась в дальнейшем наша точка зрения, возвращение к старым субстанциальным атомам является невозможным.

В настоящее время общепризнано, что все разнообразные формы материи в конечном счете состоят из двух элементарных слагающих — протонов и электронов. По своим электрическим свойствам они равны и противоположны друг другу: протон заряжен положительно, электрон — отрицательно. Но в других отношениях их свойства совершенно различны. Масса протона в 1840 раз больше массы электрона, так что почти вся масса материи сводится к массе образующих ее протонов. Изолированный протон встречается только в простейшем типе материи — водороде, атом которого состоит из одного протона и одного электрона. В других же атомах положительное ядро представляет собой соединение известного числа протонов и меньшего числа электронов. Нейтрализующие его электроны разбросаны вокруг ядра как отдаленные спутники; они могут даже отрываться от атома и свободно двигаться по

материи. Диаметр электрона равен $\frac{1}{50\,000}$ диаметра атома; диаметр ядра не на много больше; диаметр же изолированного протона, повидимому, еще значительно меньше.

Тридцать лет назад шли большие споры по поводу так называемого увлечения эфира, т. е. по поводу того, увлекается ли эфир Землей при ее вращении вокруг Солнца. В то время прочность атома считалась бесспорной, и казалось невозможным, чтобы материя могла проложить себе путь через эфир, не вызывая его возмущения. Результаты опытов, указывающие на отсутствие такого возмущения, были с этой точки зрения совершенно непонятны. Теперь же ясно, что эфир может свободно проходить через атом, как через солнечную систему.

К атомной „солнечной системе“ мы вернемся в следующих главах. Пока же нас интересуют только два свойства атома: 1) его пустота и 2) тот факт, что он построен из электрических зарядов.

Ядерная теория атома Резерфорда обычно не числится к ряду больших научных переворотов настоящего столетия. Она представляет собой большое открытие, но такое открытие, которое целиком укладывается в классическую схему физики. Природу и значение этого открытия можно выразить в простых терминах, т. е. в терминах ходячих научных концепций. Эпитетом „революционный“ обычно обозначают два великих достижения современной науки: теорию относительности и теорию квантов. Эти теории не сводятся просто к новым открытиям, а влекут за собой изменение всех наших взглядов на вселенную. Их нельзя сразу выразить в обычных терминах, так как классическая физика и не помышляла об этих концепциях.

Я не уверен, что термин „классическая физика“ когда-либо получал точное определение. Идея его заключается в том, что общая схема законов при-

роды, изложенная Ньютоном в его „Principia“, дала те рамки, в которых происходило все дальнейшее развитие. В пределах этой схемы наши взгляды могли претерпевать большие изменения: корпускулярная теория света сменилась волновой; теплоту, вместо калорической субстанции, стали рассматривать как кинетическую энергию; на место теории электрической жидкости стала теория эфирных натяжений. Но все это еще укладывалось в первоначальную схему. Понятия волн, кинетической энергии и натяжений имели в ней место и применение этих понятий для объяснения более широкого круга явлений служило только подтверждением всеобъемлющего охвата первоначальной точки зрения Ньютона.

Посмотрим теперь, каким образом эта классическая схема потеряла крах.

ФИТЦДЖЕРАЛЬДОВО СОКРАЩЕНИЕ

Удобнее всего нам будет начать со следующего факта. Рассмотрим стержень, движущийся с очень большой скоростью. Пусть сначала его направление перпендикулярно направлению движения. Повернем его теперь на 90° , т. е. поставим его по направлению движения. Стержень испытает сокращение. Вдоль направления движения он будет короче, чем тогда, когда стоял перпендикулярно ему.

Это явление, носящее название фитцджеральдова сокращения, при обычных условиях чрезвычайно мало. Оно совершенно не зависит от материала стержня и определяется исключительно его скоростью. Если эта скорость равна, например, 28 км/сек , т. е. скорости Земли вокруг Солнца, то сокращение достигает $\frac{1}{200\,000\,000}$ на единицу длины, или $5,5 \text{ см}$ на диаметр Земли.

Существование его обнаруживается рядом опытов самого разнообразного типа. Наиболее ранним и из-

вестным из них является опыт Майкельсона и Морлея, впервые произведенный в 1887 г., повторенный более точно Морлеем и Миллером в 1905 г. и вслед за ними рядом исследователей в последние один-два года. Я не буду описывать этих опытов; укажу лишь, что наиболее удобный метод для придания стержню большей скорости заключается в помещении его на Землю, движущуюся с большой скоростью вокруг Солнца. Я не буду сейчас также говорить о том, насколько убедительны эти опыты. Гораздо более важно подчеркнуть, что наблюдаемое сокращение как раз таково, какого нужно было бы ожидать на основании общеизвестных свойств материального стержня.

Вам, вероятно, кажется странным, что размеры движущегося стержня зависят от направления его движения. Скорее нужно было бы ожидать, что они останутся неизменными. Но какой стержень вы имеете в виду? Если вы себе представите его в виде непрерывной субстанции, заполняющей пространство, потому что таково свойство всякой субстанции, то тогда, действительно, изменение его размеров кажется странным. Но наука рассматривает стержень как совокупность электрических частиц, находящихся на сравнительно больших расстояниях друг от друга. С этой точки зрения, наоборот, является чудесным то, что стержень вообще имеет какие-то определенные размеры. Пространство, занятое частицами, т. е. объем стержня, остается в среднем постоянным только до тех пор, пока электрические силы, стремящиеся сблизить между собою частицы стержня, и отталкивательные силы, вызванные движением этих частиц, уравновешивают друг друга. Когда же стержень приходит в движение, электрические силы, действующие между его частицами, меняются. Движущееся электричество представляет собою электрический ток. Но электрический ток в противоположность

покоящемуся электричеству служит источником магнитных сил. Интенсивность этих сил, возникающих благодаря движению зарядов, разумеется, по направлению движения одна, а по перпендикулярному направлению—другая.

Таким образом, когда стержень, т. е. все составляющие его электрические частицы, приведен в движение, между этими частицами возникают новые магнитные силы взаимодействия. Ясно, что первоначальное равновесие при этом нарушается, и расположение частиц меняется сообразно новому положению равновесия. В частности, меняется протяженность всей системы частиц, т. е. длина стержня.

Итак, мы видим, что в фитц-джеральдовом сокращении нет ничего чудесного. Оно кажется непонятным, только если рассматривать стержень по-старому,—как непрерывную субстанцию, заполняющую пространство вследствие своей субстанциальности. Наоборот, оно является совершенно естественным свойством совокупности частиц, равновесие которых поддерживается электромагнитными силами и которые „заполняют пространство“ только в том смысле, что мешают всякому другому телу проникнуть в него. В самом деле, нужно ожидать, что длина стержня остается постоянной только до тех пор, пока силы, действующие на стержень, постоянны. При движении же стержня возникают новые магнитные натяжения, не связанные ни с какими внешними воздействиями, а являющиеся естественным свойством электрической структуры самого стержня. Под влиянием этих натяжений и происходит сокращение. Вы можете возразить, что для достаточно твердого стержня сокращение должно быть незаметно. Однако в действительности сокращение одинаково для стержня из стали и из резины: чем больше твердость стержня, тем больше и сокращающее его натяжение. Не надо думать, что невозможность сохранить постоянную длину

является недостатком стержня. Это есть недостаток только по сравнению с каким-то воображаемым „не-что“, не обладающим электрической структурой, т. е. вообще чем-то нематериальным. Фитц-джеральдово сокращение, подобно инерции, является неотъемлемым и характерным свойством материи.

Наши рассуждения носят чисто качественный характер; разработать вопрос количественно—дело математики. Эта проблема была разработана Лорентцом и Ларморов около 1900 г. Они вычислили изменение средней протяженности совокупности электрических частиц, вызываемое новыми силами, появляющимися при ее движении. В результате вычисления получилось как раз фитц-джеральдово сокращение, вытекающее из вышеупомянутых опытов. Таким образом мы можем убедиться в его существовании двояким путем: для одних предпочтительнее считать, что достоверность результата основывается на данных опыта; для других же более убедительно то, что фитц-джеральдово сокращение является необходимым следствием общепринятой схемы электромагнитных законов Максвелла. И теория и опыт иногда приводят к ошибкам, так что обе эти альтернативы одинаково хороши.

ПОСЛЕДСТВИЯ СОКРАЩЕНИЯ

Хотя этот результат сам по себе еще и не приводит к теории относительности, он уже ставит классическую физику перед большими трудностями. Когда физику нужно измерить длину (а без этого нельзя обойтись ни в одном эксперименте), он берет масштаб и укладывает его вдоль измеряемого отрезка. Никто никогда не замечал, чтобы при каждом повороте масштаба его длина менялась, а между тем, поскольку Земля движется, такое изменение должно иметь место. Постоянство измерительной шкалы есть

тот краеугольный камень, на котором строится все здание физики, и вот этот краеугольный камень начинает колебаться. Вы можете возразить, что обнаруживающаяся при этом ошибка невелика, поскольку изменение длины масштаба очень мало. Но подождите.

Рассмотрим некоторые следствия фитц-джеральдова сокращения. Начнем с несколько фантастического случая. Представьте себе планету, движущуюся очень быстро, например со скоростью 260 000 км/сек. При такой скорости сокращение достигает половины длины стержня. Всякое твердое тело, стоящее перпендикулярно направлению движения планеты, будучи повернуто вдоль этого направления, сокращается вдвое. Расстояние между двумя городами, равное 150 км в полдень, равно всего 75 км в 6 ч. полудни (так как за это время планета поворачивается вокруг своей оси на 90°). Обитатели такой планеты похожи на Алису в „Стране чудес“—они удаляются и приближаются друг к другу, как в телескопе.

Мне не известна такая планета, скорость которой достигла бы 260 000 км/сек. Но существуют спиральные туманности, делающие 1500 км/сек. Без особого произвола (говорю в данном случае как неспециалист) можно допустить, что на какой-нибудь планете, принадлежащей одной из этих туманностей, живут существа, одаренные разумом. Получающееся при скорости в 1500 км сокращение недостаточно велико, для того чтобы быть заметным в обыденной жизни. Но оно легко может быть обнаружено в научных или даже технических измерениях. Измерение длины при помощи поворачиваемого любым образом масштаба является одной из основных процедур физики. Представьте себе весь ужас физиков нашей воображаемой планеты в тот момент, когда они узнают, что их предположение о неизменности масштаба как меры длины является ошибочным.

Сколько нужно потратить труда, для того чтобы повторить все произведенные в свое время опыты, внеся в них поправки на ориентацию шкалы в данный момент, и затем напovo вывести из исправленных данных все физические законы. Каким счастьем должно казаться нашим физикам то, что они находятся не на этой быстро летящей туманности, а на такой спокойной, медленной планете, как Земля.

Однако, позвольте. Разве наша планета уже наверняка так медленно движется? Представим себе на минуту астрономов нашей воображаемой туманности, наблюдающих далеко в пространстве незначительную звезду, сопровождаемую незначительной планетой—Землей. По их измерениям эта последняя движется с большой скоростью в 1500 км/сек —так как поскольку мы видим их удаляющимися со скоростью 1500 км/сек , они, очевидно, видят и нас удаляющимися с такою же скоростью. „ 1500 км/сек !—восклицают физики из туманности:—Какие несчастные эти бедные земные физики! Фитц-джеральдово сокращение у них имеет заметную величину, и поэтому во все их измерения с масштабами нужно внести значительные поправки. Какая неверная система законов природы получилась у них, если они забыли об этих поправках!“.

Нет никаких средств для того, чтобы определить, кто здесь прав, т. е. кто в действительности движется со скоростью в 1500 км/сек . С астрономической точки зрения Млечный Путь, в состав которого входит Земля, так же мало можно считать центром вселенной, как и любую другую туманность. Нет никаких других оснований думать, что мы ближе к состоянию покоя, чем кто бы то ни было другой—это знало бы просто лстыть самим себе.

„Но,—скажете вы:—если бы на Земле происходили столь значительные изменения длины, мы могли бы обнаружить их путем измерения“. Тут мы подходим

к самому интересному пункту: мы не можем обнаружить эти изменения какими бы то ни было измерениями,—они происходят и остаются совершенно незамеченными. Разберем подробнее, в чем здесь дело.

Я утверждаю, что эта комната движется вертикально вверх со скоростью в $240\,000 \text{ км/сек}$. Вашей задачей будет опровергнуть это. Я ставлю вертикально свою лежащую горизонтально руку,—при этом она сокращается вдвое. Вы не верите мне? Тогда принесите линейку и измерьте ее. В горизонтальном положении длина руки оказывается равной 66 см , в вертикальном положении— 33 см . Но при этом вы должны считать, что, когда линейка поворачивается вертикально, каждое ее деление в 1 см сокращается до $0,5 \text{ см}$.

„Но ведь сокращение руки должно быть непосредственно видно; можем же мы верить своим глазам?“

Нет, вы не можете им верить, так как должны помнить, что как только вы сегодня утром встали, ваша сетчатка стала вдвое короче по вертикальному направлению, так что все вертикальные расстояния кажутся ей вдвое увеличенными.

„Хорошо,—говорите вы:—но я еще не считаю себя побежденным. Я лягу в постель и буду смотреть на ваше отражение в наклонном зеркале. При этом моя сетчатка остается неизменной, и все-таки я не увижу никакого сокращения“.

Но движущееся зеркало не дает правильного изображения предмета. Движение зеркала вызывает изменение угла отражения света, точно так же, как при движении борта изменяется угол отражения бильярдного шара. Если вы, исходя из обычных законов оптики, вычислите величину этого эффекта для зеркала, движущегося со скоростью $240\,000 \text{ км/сек}$, то окажется, что получающееся искажение как раз скрадывает сокращение моей руки.

Точно так же обстоит дело и с любым другим методом. Вы не можете опровергнуть мое утверждение. Но и я, разумеется, не могу доказать его: я мог бы с точно таким же правом приписать себе любую скорость. На первый взгляд это как будто противоречит тому, что я сказал раньше, т. е. что сокращение было обнаружено и измерено опытом Майкельсона-Морлея и других. Но это противоречие лишь кажущееся. Все эти опыты, наподобие вышеописанного опыта с наклонным зеркалом, являются нулевыми опытами. Требовалось обнаружить известные оптические и электрические эффекты, вызываемые движением Земли, такого же типа, как, например, искажение изображения в движущемся зеркале; они должны были бы быть наблюдаемы, если бы не было фитц-джеральдова сокращения. Обнаружить их не удалось, следовательно, компенсирующее сокращение имело место. Можно было выбрать и другую альтернативу: предположить, что истинная скорость Земли в пространстве равна нулю. Эта альтернатива была, однако, исключена повторением опыта через 6 месяцев, так как невозможно, чтобы и в том, и в другом случае скорость Земли оставалась равной нулю. Таким образом были доказаны существование сокращения и зависимость его от скорости. Но действительная величина этого сокращения, точно так же как и истинная скорость Земли (отличная от скорости ее движения вокруг Солнца) оставались неизвестными. В самом деле, при помощи каких бы оптических или электрических эффектов мы ни пытались определить эту скорость, они всегда будут компенсироваться эффектами, возникающими благодаря сокращению.

Я уже сказал, что постоянство масштаба было тем краеугольным камнем, на котором строилось все здание физики. Дополнительными подпорками к этому зданию служили те оптические и электрические ме-

тоды, при помощи которых можно было измерять длины и расстояния. Только что мы видели, что все они как будто сговорились друг с другом, и вместе с краеугольным камнем рухнули и все вспомогательные подпорки.

СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Вернемся теперь к спору между нами и физиками на туманности. Кто-то из нас двоих движется с большой скоростью, так что сокращение масштаба оказывает серьезное влияние на его научные измерения. При этом каждый считает, что ошибку делает не он, а другой. Разрешить возникающее разногласие опытным путем нельзя, так как в каждом опыте ошибка вызывает два эффекта, взаимно компенсирующие друг друга.

Такая ошибка, которая всегда сама себя компенсирует, уже по этому одному чрезвычайно любопытна. Но заметим, что эта компенсация имеет место только в наблюдаемых или могущих быть наблюдаемыми явлениях. В промежуточной же цепи рассуждений, т. е. в толковании опытов методами классической физики, ее нет.

Допустим, что мы, одновременно с физиками на туманности, наблюдаем мир, т. е. определяем место каждого предмета в окружающем нас пространстве. Кто-то из нас движется с большой скоростью, примем, что это — физики на туманности. При этом употребляемые ими масштабы сокращаются, т. е. при измерениях в определенном направлении каждое деление масштаба уменьшается. Ясно, что все расстояния по этому направлению будут казаться увеличенными. Неважно, будут ли они производить измерения при помощи линейки, теодолита или просто на-глаз: все эти методы приведут к одинаковым результатам. Если бы движение проявлялось в каком-

нибудь эффекте, то, наблюдая этот эффект, его можно было бы обнаружить; но, как мы говорили выше, и теория и опыт приводят к выводу, что такого эффекта не существует. Если физики на туманности попытаются построить квадрат, то у них получится прямоугольник. Никогда они не смогут обнаружить, что это не квадрат. Самое большее, что они могут сделать—это дойти до понимания того, что существует другой мир, наблюдатели которого думают, что данная фигура представляет собой прямоугольник и что эта точка зрения, какой бы абсурдной она ни казалась, по сути дела так же основательна, как и их собственная. Вся наша концепция пространства будет казаться им искаженной, и наоборот. И мы и они наблюдаем один и тот же мир, но располагаем его в различных пространствах. Первоначальный спор о том, кто из нас движется со скоростью 1500 км/сек, породил между нами такие разногласия, что мы уже не можем пользоваться одним и тем же пространством.

Терминам „пространство“ и „время“ можно придавать самый различный смысл. Пространством можно назвать просто пустоту или, например, определенное количество дюймов, акров, пинт. Точно так же время, с одной точки зрения, есть какой-то вечно текущий поток, а с другой—просто то, о чем нам сигнализируют по беспроводному телеграфу. Физика не может оперировать с неопределенными понятиями; и хотя они, к сожалению, еще сохранились в ней, никто ими на практике не пользуется. Поэтому когда физик говорит о пространстве, он всегда имеет в виду определенную длину или определенный объем. Именно с этой точки зрения наше пространство отлично от пространства физиков на туманности: мы воспринимаем длины и объемы по-разному. Для избежания недоразумений лучше, пожалуй, сказать, что мы пользуемся различными системами пространствен-

ного отсчета, т. е. различными системами отсчета, к которым мы относим расположение предметов. Не надо думать, что понятие системы пространственного отсчета является чем-то искусственным: оно коренится в самых основах нашего представления о пространстве.

Рассмотрим, например, тот случай, когда фитджеральдово сокращение достигает половины первоначальной длины. Если наблюдатель принимает прямоугольник 2"×1" за квадрат, то ясно, что его мозг воспринимает пространство совершенно по-иному, чем наш.

Та система пространственного отсчета, которой пользуется данный наблюдатель, зависит исключительно от скорости его движения. Для наблюдателей на различных планетах, движущихся с одинаковыми скоростями (относительная скорость которых, таким образом, равна нулю), расположение всех предметов вселенной покажется одинаковым. Наблюдателям же на планетах, движущихся с различными скоростями, придется пользоваться различными системами отсчета. Вы можете спросить, какие у меня есть основания утверждать, что воображаемые существа на других планетах интерпретировали бы результаты своих наблюдений именно так, а не иначе. При известной настойчивости с вашей стороны я, пожалуй, не буду на этом настаивать, но тогда вам придется следить за ходом тех же рассуждений, выраженных в математических символах. Моей задачей было изложить в общедоступной форме некоторые результаты, говорящие о влиянии движения на электрические, оптические и механические явления. Эти результаты были установлены рядом произведенных на Земле опытов и вычислений. Благодаря им наука в состоянии установить теперь, какие результаты дали бы измерения, производимые при помощи инструментов (искусственных или данных природой, как,

например, человеческая сетчатка), движущихся с большой скоростью. Мой воображаемый наблюдатель на туманности только в том смысле отличается от простого регистрирующего аппарата, что он не лишен обычных человеческих слабостей и думает, что бог, создавая вселенную, имел в виду главным образом его планету. Поэтому-то он (как, быть может, и мой читатель?) и не склонен приписать всерьез точку зрения тех, кто настолько легкомыслен, что движется со скоростью 1500 км/сек относительно его приходской церкви.

Наблюдатель, отличающийся исключительной скромностью, может считать покоящейся не свою собственную, а какую-нибудь другую планету. Тогда ему придется во все его измерения вносить поправку на фитц-джеральдово сокращение, вызванное его движением по отношению к этой планете. Исправленные таким образом изменения будут соответствовать системе пространственного отсчета этой планеты, а неисправленные — его собственной системе отсчета. Дилемма будет для него тем более затруднительной, что для выбора покоящегося масштаба нет никакого критерия. Как только наблюдатель освобождается от того наивного представления, что единственной правильной системой отсчета является его собственная, перед ним сейчас же встает вопрос: какая же из других бесчисленных систем отсчета правильна? Ответа на этот вопрос дать нельзя. А пока он не дан, величина тех поправок, которые нужно внести во все измерения, остается неизвестной. Таким образом наш скромный наблюдатель остается немного позади своих менее скромных сотоварищей.

Итак, суть дела заключается не в том, что система отсчета, употреблявшаяся классической физикой, оказалась неправильной, — пользуясь ею, нельзя притти к противоречию с опытом. Неправильно лишь думать, что эта система является единственной. Про-

стое обнаружение того факта, что наша система отсчета менее совершенна, чем какая-нибудь другая, не привело бы к большому перевороту в науке. Но признание полного равноправия нашей системы отсчета с бесчисленным множеством других систем, влечет за собой полный пересмотр самой интерпретации и значения понятия системы отсчета.

ВОЗРАЖЕНИЯ „ОБЫЧНОГО ЗДРАВОВОГО СМЫСЛА“

Прежде чем пойти дальше, я должен ответить критикам, аргументирующим во имя „здорового смысла“. Каждому кажется, что он так хорошо знает пространство — свое пространство: „Этот предмет находится здесь, а тот предмет — там. Я убежден в этом и меня не смогут поколебать никакие научные рассуждения о сокращающихся стержнях“.

У нас имеются известные врожденные представления о пространстве, унаследованные еще от наших обезьяноподобных предков. Эти представления так глубоко вкоренились в человеческое мышление, что чрезвычайно трудно подвергнуть их беспристрастной критике и проанализировать те весьма шаткие основания, на которых они покоятся. Обычно мы предполагаем, что каждый предмет имеет определенное местоположение в пространстве, которое нам известно. Мне кажется, что изучаемые мной предметы находятся в тех местах, в которых я их „наблюдаю“. Если же какой-нибудь наблюдатель (находящийся на другой звезде) путем манипуляции с масштабами и т. д. приходит к выводу, что предметы в действительности расположены иначе, то это просто научный парадокс, к которому реальное расположение предметов, понятное всякому здравомыслящему человеку, не имеет никакого отношения. Такая точка зрения пренебрежительно устраняет вопрос: откуда же мне известно расположение предметов? Если определять

расположение каждого предмета при помощи научных измерений с тщательными предосторожностями, то, конечно, естественно считаться со всякими добавочными факторами, влияющими на показания измерительных приборов. Если же считать, что для его определения не нужно принимать никаких предосторожностей, а что оно само приходит к нам в голову, то тогда, разумеется, в правильности полученных во имя здравого смысла результатов не приходится сомневаться. В глубине души каждому из нас кажется (хотя мы и не любим в этом признаваться), что человеческий мозг протягивает в пространство особые щупальцы и при их помощи узнает, где находится каждый предмет. Конечно, это не верно, и наши обычные представления о пространстве получаются вовсе не таким путем. Строго говоря, эти представления базируются не на здравом смысле (*common-sens*), а на непосредственных ощущениях (*sense*). Они вырабатываются отчасти при помощи прикосновения или передвижения: до такого-то предмета я могу достать рукой или дойти в несколько шагов. Ясно, что никакой принципиальной разницы между этими методами (если отвлечься от их неточности) и научными измерениями с масштабом не существует. Отчасти здесь играет роль и зрение, т. е. неточное воспроизведение научных измерений с теодолитом. Таким образом наши обычные представления о расположении вещей вовсе не являются таинственными откровениями какого-то непогрешимого существа, а представляют собой результаты наблюдений того же типа (только менее точных), какие применяются в научных исследованиях. В пределах возможных ошибок та схема расположения предметов, которая мне „дается“ инстинктом, совпадает с моей научной схемой, т. е. с системой пространственного отсчета.

Заменяя хрусталик и сетчатку тщательно сделанной линзой телескопа и чувствительной пластинкой,

мы не вносим ничего принципиально нового в наши пространственные наблюдения, а только повышаем их точность. Это уточнение дает нам возможность обнаружить такие свойства пространства, которые не были известны нашему обезьяноподобному предку и потому не вошли в обыденный круг его мышления, унаследованный нами. Его схема расположения предметов остается пригодной лишь до тех пор, пока скорость движения наблюдателя хотя бы приблизительно постоянна (разница в несколько миль в секунду не играет здесь большой роли). Значительное же изменение скорости вызывает необходимость в переходе к новой схеме, которая так же пригодна, как и первая, хотя и не совпадает с ней. Так как число этих схем, т. е. систем пространственного отсчета, бесконечно, то мы не можем утверждать, что все они соответствуют „действительному расположению“ предметов. Расположение предметов не есть какое-то сверхъестественное откровение мысли: оно служит просто условным обозначением тех свойств или соотношений между предметами, которые обуславливают определенные ощущения зрения или осязания.

Не свидетельствует ли это обстоятельство о том, что „истинное местоположение“ в пространстве далеко не является столь важным и фундаментальным понятием, как это предполагалось в схеме Ньютона? Ведь различные наблюдатели могут совершенно спокойно обходиться и без этого понятия.

Из всего вышеизложенного напрашивается сделать вывод, что термин „местоположение“, хотя он и не лишен известного содержания, не может рассматриваться как нечто совершенно определенное (с чем оперировала классическая физика), т. е. что наряду с правильной мыслью Ньютон вложил в понятие местоположения кое-что лишнее, именно из-за чего и спорят наши наблюдатели. Такое допущение объяснило бы многое. В частности, оно объяснило

бы, почему все силы природы как будто сговорились для того, чтобы помешать нам определить точное местоположение каждого предмета (т. е. его местоположение в „правильной“ системе пространственного отсчета). Это местоположение однозначно определить нельзя просто потому, что его не существует.

РЕЗЮМЕ

Эта мысль будет развита в следующей главе. Повторим пока вкратце ход рассуждений вплоть до достигнутого пункта. Началом пересмотра классических понятий послужило несовершенство нашего, считавшегося ранее столь достоверным масштаба, обнаруженное рядом опытов и, помимо того, с необходимостью вытекающее из электрической теории материи. Это несовершенство является характерным свойством всех типов материи; оно проявляется также и в электрических и оптических измерительных приборах. Обусловливаемая им ошибка не может быть обнаружена ни одним из обычных методов измерения. Ее можно обнаружить, только изменив состояние движения измерительных приборов, т. е. сравнивая длины и расстояния, измеренные на Земле, с теми же длинами и расстояниями, измеренными воображаемыми наблюдателями на планете, движущейся с другой скоростью. Будем пока называть те длины, в измерение которых вкралась эта ошибка, „фиктивными длинами“.

Согласно ньютоновой схеме длина определена однозначно, и каждый наблюдатель должен вносить в измерения им фиктивные длины поправки (зависящие от его движения), чтобы привести их к однозначной ньютоновой длине. На это можно возразить двояко. Во-первых, поправки для приведения к ньютоновой длине нам неизвестны. Мы знаем только, какие поправки нужно внести в наши фиктивные длины

для того, чтобы перейти к фиктивным длинам наблюдателя с любым другим состоянием движения; но не существует никакого критерия, для того чтобы определить, какая именно из всех длин есть та, о которой идет речь в схеме Ньютона. Во-вторых, вся современная физика обосновывается на наблюдениях, произведенных земными наблюдателями, в которые вышеупомянутые поправки не внесены, так что все ее утверждения относятся не к ньютоновым, а к фиктивным длинам.

На первый взгляд фитц-джеральдово сокращение кажется слишком незначительным явлением для того, чтобы из-за него стоило разрушать все здание классической физики. Но надо помнить, что если бы в наших методах измерения длины была обнаружена серьезная ошибка, пришлось бы признать несостоятельными почти все опыты, на которых базируется современная наука. И вот оказывается, что эти методы не гарантированы от систематически накапливающихся ошибок. Хуже всего то, что в каждом данном случае неизвестно,—и есть все основания думать, что и никогда не будет известно,—сделана эта ошибка или нет.

Глава II. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

ПРИНЦИП ЭЙНШТЕЙНА

Перед скромным наблюдателем, о котором шла речь в первой главе, стояла задача сделать выбор среди бесчисленного множества систем пространственного отсчета.

Как мы уже говорили выше, никакого критерия, которым он мог бы руководствоваться, не существует. Все системы отсчета различны в том смысле, что они приписывают каждому предмету (и самому наблюдателю) различные местоположения в пространстве. Но, с другой стороны, их нельзя отличить друг от друга, поскольку к какой бы системе отсчета мы ни относили мир, он ведет себя все время сообразно одним и тем же законам. Благодаря тому, что наш наблюдатель сам родился на одной из планет, он до сих пор некритически пользовался системой отсчета, связанной с этой планетой. Теперь он понимает, что нет никаких оснований для того, чтобы именно эту систему отсчета считать правильной. Какая же из систем отсчета правильна?

И вот тут-то появляется Эйнштейн и говорит: „Вы ищете так называемую правильную систему отсчета. В чем же заключается ее правильность?“

Вы стоите с ярлыком в руке перед рядом совершенно одинаковых ящиков и не знаете, к какому ящику его нужно привесить. Посмотрите, что написано на ярлыке.—Ничего.

Слово „правильный“ в применении к системам про-

странственного отсчета есть ярлык, на котором ничего не написано. Говоря это, мы подразумеваем, что есть что-то, отличающее правильную систему отсчета от неправильной. Когда же нам задают вопрос, в чем заключается это характерное свойство правильной системы, мы можем только сослаться на ее „правильность“, что ни капли не разъясняет смысла этого термина и не убеждает в том, что он вообще имеет какой-либо смысл.

Я готов признать, что в будущем, может быть, удастся отыскать какие-нибудь характерные признаки, отличающие одну систему пространственного отсчета от любой другой (хотя мне это кажется мало вероятным, я все же не исключаю такой возможности). Какой-нибудь будущий физик, может быть, найдет, что система отсчета, связанная, например, с созвездием Арктур, обладает каким-то единственным в своем роде свойством, неизвестным современной науке. Тогда, разумеется, наш друг поторопится привесить к ней свой ярлык: „Я же говорил вам, я знал, что система отсчета, связанная, например, с созвездием Арктур, обладает каким-то единственным в своем роде свойством, неизвестным современной науке. Тогда, разумеется, наш друг поторопится привесить к ней свой ярлык: „Я же говорил вам, я знал, что в понятии правильной системы отсчета что-то кроется“. По-видимому, вряд ли целесообразно говорить о вещах, не имеющих смысла, на том основании, что потомство, может быть, откроет в них какой-нибудь смысл. Тем, кто теперь говорит о правильной системе пространственного отсчета, можно ответить словами ткача Боттома: „Кто станет говорить этой глупой птице? Кто уличит ее во лжи, хотя она никогда не куковала так?“

С точки зрения теории Эйнштейна вопрос о том, какая система пространственного отсчета является единственно правильной, не имеет смысла. Существует система пространственного отсчета относительно земного наблюдателя, система отсчета относительно наблюдателя на туманности или на какой-нибудь звезде и т. д. Вообще системы пространственного отсчета относительны. Расстояния, длины, объемы—все те ве-

личины, которые характеризуют свойства пространства,—тоже относительны. Наблюдатель, измеривший какое-нибудь расстояние на одной звезде, может считать результат своих наблюдений правильным с точно таким же правом, как и наблюдатель на любой другой звезде. При этом результаты их наблюдений вовсе не должны совпадать друг с другом: один дает величину расстояний в одной системе пространственного отсчета, другой—в другой системе. Понятие абсолютного расстояния, не отнесенного ни к одной из систем отсчета, не имеет смысла.

Заметим, что относительность вслед за системами пространственного отсчета затрагивает и ряд других физических величин. Каждый из нас, наверное, видел таблицы „размерности“ различных физических величин, показывающие, каким образом эти величины связаны со способом отсчета длины, времени и массы. Изменение в способе отсчета длины влечет за собою изменение в способе отсчета ряда других физических величин.

Рассмотрим, например, покоящийся на Земле электрический заряд. Поскольку он покоится, он дает только электрическое поле (магнитное поле покоящегося заряда равно нулю). Но с точки зрения физика на туманности этот заряд движется со скоростью 1500 км/сек . Движущийся заряд представляет собой электрический ток, который согласно законам электромагнетизма образует магнитное поле. Каким образом одно и то же тело может одновременно давать и не давать магнитное поле? По классической теории в действительности имеет место или то или другое (т. е. один из полученных результатов—нет никакого критерия для того, чтобы узнать, какой именно,—классическая теория толкует как фиктивный). По теории же относительности и то и другое правильно. Магнитные поля относительны. Относительно земной системы пространственного отсчета магнитное поле

равно нулю; относительно же системы отсчета, связанной с туманностью, оно имеет конечную величину, отличную от нуля. Физик из туманности со своими приборами обнаружит существование магнитного поля, тогда как наши приборы не обнаружат его. Это объясняется тем, что его приборы покоятся по отношению к его планете, а наши приборы—по отношению к Земле (иначе говоря, каждый наблюдатель вносит в свои наблюдения поправки, для того чтобы согласовать их с показаниями приборов, покоящихся относительно его системы отсчета).

Существует ли в действительности магнитное поле или нет? Этот вопрос аналогичен поставленному выше вопросу о квадрате и прямоугольнике. Поле можно определять только по отношению к какой-нибудь планете; абсолютного же определения дать нельзя.

Правда, не все физические величины имеют смысл только по отношению к данной системе пространственного отсчета. Умножая, деля и т. д. физические величины друг на друга, мы получаем новые величины: так, например, произведение массы на скорость есть количество движения; частное от деления энергии на время есть мощность. Действуя таким путем, можно построить инвариантные величины, т. е. не зависящие от выбора системы пространственного отсчета. Оказывается, что некоторые из этих величин, в частности „действие“ и „энтропия“, были уже известны старой дорелятивистской физике. Релятивистская физика обнаружила и целый ряд других инвариантов, установление которых имеет для нее большое значение. Поэтому неправильно говорить, что согласно теории Эйнштейна „все относительно“. В действительности теория Эйнштейна утверждает: „В мире существуют абсолютные величины, отыскание которых требует глубоких исследований. Те же величины, которые первыми бросаются в глаза, по большей части относительны“.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ И АБСОЛЮТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Я хочу указать на различие между абсолютными и относительными величинами. Число членов дискретной совокупности есть абсолютная величина. Она представляет собою результат абсолютной операции — счета.

Если два наблюдателя считают, сколько людей находится в этой комнате, и приходят к различным результатам, то это значит, что один из них ошибается.

Измерение же расстояния — не абсолютная операция. Два человека могут измерить одно и то же расстояние и прийти к различным результатам, причем никто из них не совершает ошибки.

Я отмечаю на доске две черточки и прошу двух студентов измерить, насколько возможно точно, расстояние между ними. Чтобы не возникло никаких сомнений насчет того, что я понимаю под расстоянием, я даю им точные указания, каким масштабом они должны пользоваться и какие предосторожности нужно соблюдать при измерении. Они приносят мне два различных результата. Я прошу их сравнить записи своих наблюдений, чтобы выяснить, кто из них неправ и чем вызвана его ошибка. Они возвращаются ко мне и говорят: „В том, что наши результаты не сходятся, виноваты вы, так как в одном отношении ваши инструкции были неточны. Вы не упомянули о том, каким образом должен двигаться тот масштаб, при помощи которого производится измерение“. Один из студентов без особого раздумья воспользовался масштабом, покоящимся по отношению к Земле. Другому же пришло в голову, что Земля слишком незначительная планета и что профессор о ней весьма низкого мнения. Он решил, что движение масштаба должно соответствовать движению какого-нибудь более солидного тела, и потому выбрал масштаб, покоя-

щийся относительно громадной звезды Бетельгейзе. Разумеется, благодаря фитц-джеральдову сокращению у обоих получились различные результаты.

Но я не склонен довольствоваться этими объяснениями. „Вовсе не нужно было прицепляться к Земле, к Бетельгейзе или к какому-нибудь другому телу. Вообще не нужно пользоваться масштабом, не имеющим отношения к данной задаче. Я велел вам измерить расстояние между двумя точками на доске; вы должны были взять масштаб, покоящийся относительно доски. Совершенно ясно, что нужно пользоваться таким масштабом, который движется вместе с измеряемым предметом. Запомните это на следующий раз“.

Через несколько дней я даю им задание измерить длину волны (т. е. расстояние между соседними гребнями) желтой линии натрия. Они его выполняют и приходят ко мне с торжествующим видом: „Длина волны бесконечно велика“. Я им указываю, что это не согласуется с цифрой, данной в книге (0,000059 см). „Да, — отвечают они, — мы заметили это, но данные в книге неправильны. Вы сказали нам, что нужно двигать масштаб вместе с измеряемым предметом. Поэтому мы с большим трудом и хлопотами заставили наши масштабы мчаться по лаборатории со скоростью света. При этой скорости фитц-джеральдово сокращение бесконечно велико, каждое деление масштаба сокращается до нуля, так что требуется бесчисленное множество этих делений для того, чтобы заполнить промежуток между двумя соседними гребнями волны“.

Мое добавочное правило оказалось в известной мере хорошим, поскольку оно дало возможность получить абсолютный результат, одинаковый для всех наблюдателей. Но, к сожалению, этот результат вовсе не совпадает с измеряемой длиной или расстоянием. Вместо того, чтобы выяснить, является ли расстояние абсолютной или относительной величиной, я зара-

нее постулировал, что оно должно быть абсолютным. Для того же чтобы этот постулат удовлетворялся, термину „расстояние“ пришлось придать новый, необычный смысл.

Наши предки поступили совершенно правильно, назвав „расстоянием“ не результат вышеописанного абсолютного и однозначного измерения, а обычно понимаемую под этим термином относительную величину. Предложенное мною добавочное правило является шагом назад. В самом деле, часто приходится рассматривать системы тел, движущихся с различными скоростями, и было бы весьма неудобно и затруднительно измерять каждое тело покоящимся относительно его прибором и потом сопоставлять полученные результаты друг с другом. Поэтому наши предки поступали весьма целесообразно, относя все расстояния к одной системе пространственного отсчета; ошибка их заключалась в том, что получаемым таким путем результатам они приписывали абсолютное значение.

Наряду с расстоянием на Земле, на Бетельгейзе и т. д. можно рассматривать и соответствующие определяемые моим вспомогательным правилом абсолютные величины, изучение которых тоже представляет известный интерес. Эти величины называются „собственными расстояниями“. Вам, может быть, кажется более приятным иметь дело с абсолютными величинами, и потому вы хотите пользоваться собственными расстояниями? Прекрасно. Но имейте в виду, что тем самым вы отходите от классической схемы физики, основой которой служат относительные расстояния. Поиски же абсолютного приводят к четырехмерному миру.

В качестве более обычного примера относительной величины можно привести то „направление“, под которым виден какой-нибудь данный предмет. Кэмбридж виден из Лондона под одним направлением, из

Эдинбурга—под другим и т. д. Никому не приходит в голову смотреть на это как на какой-то парадокс и думать, что должно существовать какое-то абсолютное, поныне неизвестное направление, под которым виден Кэмбридж. Точно так же нельзя думать, что существует какое-то абсолютное расстояние между двумя точками. Конечно, здесь есть известная разница: направление зависит от местоположения наблюдателя, а расстояние—от его скорости. Свое местоположение мы можем менять как угодно, тем самым внося значительные изменения в относительные направления. Наибольшая же скорость, которую мы можем себе придать—450 км/час—слишком незначительна для того, чтобы вызвать заметные изменения в наблюдаемых расстояниях. Поэтому относительность расстояния, в противоположность относительности направления, не проявляется в обыденной жизни, и в нашем мозгу, к сожалению, укоренилась мысль об абсолютности расстояний.

Относительной величиной является также хотя бы фунт стерлингов. Что бы ни говорили теоретики, на фунт до самого последнего времени смотрели, как на какой-то абсолютный представитель определенного богатства. Но жестокая действительность убедила нас в его относительности. Сначала мы еще держались за мысль об абсолютности фунта и старались описать создавшееся положение парадоксальными утверждениями, вроде того что фунт фактически свелся к какому-то количеству пенсов. Но мало-помалу мы свыклись с новым положением вещей и снова стали выражать денежные суммы в фунтах, попросту признав, что фунт относителен и потому вовсе не должен обладать теми свойствами, которые обычно приписываются абсолютным величинам.

Существенно новую точку зрения, внесенную в физику принципом относительности Эйнштейна, можно сравнить с теми изменениями, которые претерпела

экономическая наука вследствие признания относительности стоимости денег. При обычных обстоятельствах эта относительность проявляется в небольших колебаниях международного курса, которые аналогичны небольшим изменениям длины, обнаруживаемым лишь тщательно поставленными опытами вроде опыта Майкельсона-Морлея. В исключительных же случаях относительность бросается в глаза: когда курс марки подсказывает до миллиардов или когда радиус быстро летящей α -частицы сокращается до $\frac{1}{3}$ своей первоначальной длины. Но обычно эти случаи встречаются редко. Ясно, что тот экономист, который верит в абсолютное значение фунта стерлингов, не понял сути дела. Точно так же, приписывая тем расстояниям, силам и массам, которые, как мы видели, относятся только к данной системе отсчета, какое-то абсолютное значение в физическом мире, мы далеко отошли бы от истинного понимания природы вещей.

СХЕМА МИРОЗДАНИЯ

Вернемся снова к наблюдателю, безуспешно старавшемуся отыскать „правильную“ систему пространственного отсчета. Под „правильной“ он, повидимому, подразумевал систему отсчета самой Природы, т. е. ту систему, исходя из которой Природа установила равновесие тяготеющих друг к другу планет и выработала симметрию электронов, выточенных на ее токарном станке. Но Природа оказалась слишком хитрой: она не оставила никаких следов, по которым можно было бы узнать, какой системой отсчета она пользовалась. А может быть здесь и не было особенной хитрости—может быть, Природе не нужна была никакая система пространственного отсчета. Я позволю себе привести одно сравнение.

Когда-то был археолог, который пытался определять дату построения древних храмов, исходя из

ориентации в пространстве. Он думал, что эти храмы всегда строились по направлению к точке восхода определенных звезд. Так как благодаря прецессии точка восхода каждой звезды со временем меняется, то, зная направление храма, указывающее на то место, где восходила звезда в момент его построения, можно определить эпоху его построения. Однако для одного племени такой метод оказался непригодным,—это племя строило только круглые храмы. Археологу это показалось какой-то необыкновенной хитростью со стороны племени, сделанной с той целью, чтобы нарочно скрыть дату построения храмов. Однако один критик выдвинул другое остроумное предположение: что это племя просто не интересовалось астрономией.

Подобно этому критику, я не думаю, что Природа проявила какую-то особую хитрость, для того чтобы скрыть избранную ею систему отсчета. С помощью этих систем можно весьма удобно выражать результаты наших измерений, но они не играют никакой роли в архитектуре нашей вселенной. Ясно, что вселенная не могла быть построена так, чтобы план ее построения был скрыт. В этом случае получилось бы что-то похожее на схемы Белого Рыцаря.

Отсюда следует, что, для того чтобы понять истинный смысл построений природы, нужно отказаться от рассматривания систем пространственного отсчета. Сама Природа ими совершенно не пользовалась, и потому они могут только затемнить простоту ее схемы. Я вовсе не хочу этим сказать, что нужно перестроить всю физику, выбросив из нее все величины, связанные с системами пространственного отсчета. Кроме основной задачи обнаружения истинного плана структуры вселенной, наука имеет и целый ряд других задач. Но если ограничиться только этой основной проблемой, то нужно первым делом освободиться от систем пространственного отсчета.

Это должно повлечь за собой пересмотр всех клас-

сических концепций. Возьмем, например, закон обратных квадратов, которому, как известно, приблизительно удовлетворяют гравитационные и электрические силы. Этот закон привлекает нас главным образом своей простотой—он прост не только с математической точки зрения, но служит естественным выражением ослабления того или иного эффекта по мере его распространения в трехмерном пространстве. Отсюда возникает стремление считать его точным законом, характеризующим гравитационное и электрическое поля. Однако с точки зрения самой Природы закон обратных квадратов вовсе не так уж прост. Расстояние имеет смысл лишь по отношению к данной системе пространственного отсчета; величина его зависит от выбора этой системы. Поэтому закону обратных квадратов можно придать смысл, только зафиксировав ту систему пространственного отсчета, в которой он удовлетворяется. Но для выбора этой системы Природа не предоставила нам никакого критерия. Даже если внести в закон обратных квадратов такие специально подобранные поправки, чтобы вытекающие из него опытные следствия были одинаковы для всех систем пространственного отсчета (что в его обычной формулировке не имеет места), истинный смысл этого закона все же будет для нас неясен. В гл. IV мы изложим новую точку зрения на закон тяготения (которая в большинстве случаев приводит практически к тем же результатам, что и старая) и найдем его выражение, не связанное с выбором специальной системы отсчета. Таким образом принцип относительности дает нам новый путь отыскания законов, управляющих явлениями природы.

СКОРОСТЬ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЭФИРУ

Справедливость теории относительности, очевидно, связана с невозможностью обнаружить абсолютную скорость. Если бы в нашем споре с физиками на

туманности одной из сторон удалось доказать, что она находится в абсолютном покое, то это было бы достаточным доводом для того, чтобы предпочесть ее систему отсчета. С философской точки зрения движение может быть только относительным. Движение есть изменение места по отношению к *чему-то*; изменение же места по отношению к какому-то *ничто* не имеет смысла. Но для физики проблема этим еще не разрешена. Физика не очень щепетильна в употреблении слова „абсолютный“. Абсолютным можно было бы назвать движение по отношению к эфиру или какой-нибудь другой системе отсчета, имеющей всеобщее значение.

Оказалось, однако, что системы отсчета, связанной с эфиром, не существует. Движение можно обнаружить только по отношению к разбросанным во вселенной кускам материи; движение же по отношению к океану эфира ускользает от нас. В самом деле, попробуем обозначить скорость тела по отношению к эфиру через v и рассмотрим те уравнения электромагнитного поля, в которые входит v . Если вставить в эти уравнения значение величин, могущих быть наблюдаемыми, и попытаться исключить из них все неизвестные, кроме v , то, как только мы освободимся от этих неизвестных,—увы!—сократится и само v . В результате получится бесспорное, но неутешительное следствие: $0=0$.

Такой ответ обычно дают математические уравнения, когда мы предлагаем глупые вопросы. Что-нибудь в этом роде получилось бы, если бы мы захотели определить широту и долготу точки, лежащей к северо-западу от северного полюса. „Скорость по отношению к эфиру“ так же не имеет смысла, как „северо-запад от северного полюса“.

Это, конечно, не значит, что эфир вообще не существует. Эфир нам нужен. Нельзя разложить физический мир на изолированные частицы материи и

электричества, пространство между которыми лишено всяких свойств. Промежуточное пространство, как и сами частицы, также обладает известными свойствами, для описания которых в современной физике служит целая армия символов. Эти свойства мы приписываем определенному носителю—эфиру, точно так же, как свойства частиц мы приписываем материи и электричеству. Может быть, философам покажется возможным говорить просто о свойствах, не говоря ничего о их носителе. Тогда одним ударом будет покончено и с материей и с эфиром. Но это несколько не относится к делу.

В XIX столетии на эфир смотрели как на один из видов материи, обладающей характерными признаками материальных тел: массой, твердостью, движением. Трудно сказать, когда эта точка зрения была окончательно оставлена. В Англии она задержалась дольше, чем на континенте, но и там перестала считаться ортодоксальной еще за несколько лет до появления теории относительности. Логически рассуждая, от нее отказались уже те многочисленные исследователи прошлого столетия, которые рассматривали материю как собрание вихрей, узлов, водоворотов и т. д. в эфире. Впрочем, вряд ли эти исследователи всегда рассуждали в достаточной мере логично.

В настоящее время общеприято, что эфир не является видом материи, а обладает совершенно особыми своеобразными свойствами, которые должны быть обнаружены на опыте. При этом, поскольку мы не связаны никакими представлениями о сущности эфира, каковы бы ни были результаты опытов, они ни в коей мере не должны нас удивлять. Естественно, что эфир лишен характерных признаков материи—массы и твердости, но зато он обладает другими характерными признаками. Если по отношению к материальному океану мы можем сказать, что данная частица воды, которая несколько секунд тому назад

находилась „здесь“, теперь находится „там“, то по отношению к океану эфира утверждений такого типа делать нельзя. Частицы эфира нельзя рассматривать как постоянно сохраняющиеся индивидуумы,—современная наука показывает, что такую концепцию надо отбросить. Скорость по отношению к эфиру определить невозможно,—нельзя сказать, движется ли эфир в этой комнате к северной или южной стене. Для материального океана такой вопрос имел бы смысл, но откуда вовсе не следует, что он имеет смысл и для нематериального океана эфира.

Сам по себе эфир, как и раньше, занимает одно из основных мест в нашей теперешней схеме мироздания. Но скорость по отношению к эфиру похожа на вечно ускользающую мистрисс Гаррисс, и Эйнштейн заразил нас своим смелым скептицизмом: „Я не думаю, чтобы такая личность когда-либо существовала“.

РЕАЛЬНО ЛИ ФИТЦ-ДЖЕРАЛЬДОВО СОКРАЩЕНИЕ?

Меня часто спрашивали, имеет ли фитц-джеральдово сокращение место в действительности. Это явление было изложено в первой главе еще до введения идеи относительности, и, может быть, не совсем ясно, какое место оно занимает в той новой концепции природы, какую дает релятивизм. Естественно, что в первой главе, где я пользовался еще терминологией классической физики, для того чтобы продемонстрировать ее недостаточность, содержится ряд утверждений, которые совершенно иначе выглядели бы в релятивистской физике.

Действительно ли правильно, что движущийся стержень сокращается по направлению своего движения? На этот вопрос не так легко дать простой ответ. Мне кажется, что можно делать различие между правильным и действительно правильным. Утвержда-

дение, относящееся только к внешней видимости явления, может быть правильным; утверждение же, которое не только правильно, но и соответствует более глубокой сути явления, действительно правильно.

Вы просматриваете баланс акционерного общества и видите, что его основной капитал достигает такой-то цифры. Правильно ли это? Конечно, это засвидетельствовано главным бухгалтером. Но правильно ли это в действительности? Тут встает целый ряд вопросов: истинное значение той или иной статьи может быть отлично от значения, указанного в балансе. Я не говорю о просто нечестных компаниях. Существует всепасающее словечко—„секретные фонды“; и вообще говоря, чем большим уважением пользуется данная компания, тем больше ее баланс отличается от действительности. Громко выражаясь, это называется финансовыми операциями. Но если даже отвлечься от использования баланса с целью скрыть действительное положение вещей, нужно признать, что баланс представляет собою не очень удачное средство для описания действительности, так как его главная задача состоит в том, чтобы все было сбалансировано, остальное же является второстепенным.

Пользуясь системой пространственного отсчета, физик должен дать отчет о каждом миллиметре пространства, т. е. составить баланс и сбалансировать его. Обычно это не представляет больших затруднений. Но допустим, что нашему физiku приходится иметь дело с человеком, движущимся со скоростью 260 000 км/сек. Этот человек обладает обычным 6-футовым ростом. Эти 6 футов представляют собой авансированный капитал в балансе. Но если исходить из такой цифры, то баланс не сойдется. Величина израсходованного пространства показывает, что расстояние от макушки до подошвы сапог человека должно равняться всего 3 футам. Поэтому в балансе длина человека „списывается“ до 3 футов.

Фитц-джеральдово сокращение и есть это списывание длины для целей сбалансирования. Утверждение о сокращении движущегося стержня правильно, но не действительно правильно. Это утверждение относится не к действительности (т. е. к абсолютному)¹, а лишь к тем наблюдениям, которые произведены в нашей системе отсчета. Длина одного и того же предмета различна в различных системах пространственного отсчета. Для 6-футового человека она может быть равна 3 футам. Утверждение, что длина быстро движущегося человека равна 3 футам, правильно, но оно не выражает собою никакого свойства, присущего данному человеку. Оно говорит только, что наша система отсчета такова, что в ней его длина равна 3 футам. Если бы этого не было у нас, то это имело бы место в какой-нибудь другой системе отсчета.

Может быть, вам покажется, что мы должны изменить свой метод ведения счета пространства так, чтобы этот счет непосредственно соответствовал действительности? Мы готовы выполнить ваше желание. Благодаря Минковскому был найден такой метод счета, который выражает действительные (т. е. абсолютные) факты и дает возможности добиться сбалансирования. Правда, его не нужно торопиться применять в обыденной жизни, так как это сбалансирование производится в четырехмерном мире.

РЕЗЮМЕ

Прежде чем погрузиться в область четырех измерений, бросим еще раз взгляд на пройденный нами

¹ Собственная длина (стр. 34) остается неизменной, меняется лишь относительная длина. Мы уже видели, что под словом „длина“ обычно подразумевается именно последняя, и, говоря о сокращении длины стержня, мы имели в виду обычный смысл этого слова.

путь. Мы столкнулись с фактом, неизвестным классической физике,—с существованием бесчисленного множества совершенно равноправных систем пространственного отсчета. Оказалось, что вместо расстояния, магнитной силы, ускорения и т. д., которые по классическим представлениям должны быть определенными и однозначными, существуют различные расстояния и т. д., соответствующие различным системам отсчета, для выбора между которыми нет никакого критерия. Это затруднение мы разрешили наиболее простым способом: мы отбросили ту мысль, что одна из систем отсчета правильна, а остальные представляют собой только суррогаты, и приняли их всех en bloc. Таким образом мы приняли, что расстояние, магнитная сила, ускорение и т. д. относительны, подобно, например, направлению и скорости, относительность которых была известна и раньше. В основном это не меняет структуры нашей физики; нужно только отказаться от некоторых предположений и молчаливых допущений, которые касаются вышеупомянутых величин и которые основывались на представлении об их абсолютности. В частности такой закон природы, который кажется простым и удобным для абсолютных величин, может оказаться совершенно неприменимым к относительным величинам и потребует соответственного исправления. Хотя сама структура физики осталась в основном нетронутой, лежащие в ее основе концепции претерпели радикальные изменения. Мы далеко ушли от старой точки зрения, требующей построения механических моделей для всех явлений природы. Даже расстояние между двумя точками не является абсолютным и однозначным. Относительность обычно употребляемых в физике величин заставляет нас идти глубже и попытаться найти лежащую под ними абсолютную схему. Только тогда мы сможем увидеть мир в его истинной перспективе.

Глава III. ВРЕМЯ

ВРЕМЯ КОРОЛЕВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Мне иногда приходит в голову, что было бы интересно прослушать дискуссию между директором Королевской обсерватории, с одной стороны, и хотя бы проф. Бергсоном—с другой, по вопросу о природе времени. Авторитет проф. Бергсона по этому вопросу широко известен. С другой стороны, и директор Королевской обсерватории, на обязанности которого лежит определение времени для нужд нашей повседневной жизни, тоже, вероятно, имеет представление о том, что ему приходится измерять. Спор между ними был бы особенно любопытен лет 20 назад, до того как широкое распространение идей Эйнштейна в известной мере сблизило их. По всей вероятности в споре выявились бы резкие разногласия, причем словесная победа, пожалуй, осталась бы за философом. Логически доказав, что представления директора Королевской обсерватории о времени не выдерживают критики, проф. Бергсон, паверное, вынул бы часы и поспешил на поезд, отходящий согласно времени, измеренному Королевской обсерваторией.

Каким бы ни было время *de jure*, время Королевской обсерватории есть время *de facto*. Этим временем мы пользуемся во всех областях физики. Существование его основывается не на логических доводах, а на чем-то более сильном—на непосредственной целесообразности. Им проникнута вся ткань

классической физики. Слово „время“ в физике означает время Королевской обсерватории. Вам, наверно, известно, что согласно теории Эйнштейна время и пространство связаны друг с другом несколько странным образом. Для начинающего это всегда является камнем преткновения. Он говорит: „Это невозможно. Я всеми фибрами своего существа чувствую, что природа времени совершенно отлична от природы пространства. Между ними нельзя установить никакой связи“. На это директор Королевской обсерватории совершенно спокойно отвечает: „Это не невозможно, я установил связь между ними“. Довольно, этим все кончено. Если директор Королевской обсерватории установил связь между пространством и временем, то эта связь должна послужить фундаментом всей новой физики.

Здесь мы встречаемся с двумя по сути дела различными вопросами. Первый вопрос: какова истинная природа времени? Второй вопрос: какова истинная природа той величины, которая под видом времени играет весьма существенную роль в классической физике? Долголетние теоретические и экспериментальные исследования привели к объединению всех найденных физикой результатов в одну стройную схему, которая в общем блестяще оправдала себя. Значение времени Королевской обсерватории состоит в том, что оно является частью этой схемы, как бы ее цементирующим материалом. Это значение несколько не умалится, если выяснить, что время Королевской обсерватории не совсем удовлетворяет тем субъективным представлениям о времени, которые коренятся в нашем сознании. Мы считаем поэтому более важным второй из вышеупомянутых вопросов.

Заметим, однако, что теория Эйнштейна не только дает ответ на второй вопрос, обнаруживая, что физическое время неразрывно связано с пространством,

но дает возможность разобраться в первом вопросе. Существует такая величина, о которой дорелятивистская физика ничего не знала и которая более непосредственно соответствует нашему субъективному представлению о времени. Она называется собственным временем или интервалом и коренным образом отличается от собственного пространства. Я полностью поддерживаю поднятый вами во имя здравого смысла протест против смешения пространства со временем. Пространство и время—это две совершенно различные вещи. Но обычная картина трехмерного пространства, существующего во времени, есть неудачная попытка выявить это различие. Надо вернуться к девственному четырехмерному миру и попытаться построить его так, чтобы обнаружилась разница между пространством и временем. При этом воскресает почти забытое субъективное время, и оказывается, что оно играет большую роль в абсолютной схеме природы.

Попытаемся прежде всего выяснить, почему физическое время не совпадает с непосредственно воспринимаемым нами временем.

Мы приписываем времени определенные свойства и рассматриваем их почти как аксиомы, хотя они не подтверждаются никакими непосредственными наблюдениями. Возьмем хотя бы следующий пример. Мы считаем, что если два человека встретились дважды, то промежуток времени между встречами был одинаков для них обоих, даже если кто-нибудь из них успел достичь очень отдаленной точки вселенной и вернуться оттуда.

Но такой эксперимент проделать невозможно, ответите вы. Правильно, это лежит вне всякого опыта. Но тогда зачем же ссылаться на повседневный опыт в противовес теории, которая отрицает вышеупомянутое утверждение? И все же большинство будет с уверенностью заявлять, что это утверждение пра-

вильно. Это большинство составляло себе представление о времени как о чем-то вечно текущем вне нас и даже не дает себе труда проверить, верно ли это с точки зрения наших фантастических наблюдений над временем.

Хотя мы и не можем проделать путешествия в отдаленные области вселенной, наука нам дает возможность определить, каким образом меняется скорость атомных и других физических процессов при переходе от состояния покоя к быстрому движению. Мы знаем, что все физические процессы происходят у движущегося человека медленнее (сообразно времени Королевской обсерватории), чем у покоящегося. В этом нет ничего особенно загадочного. И теория и эксперимент показывают, что масса, т. е. инертность материи, растет при возрастании ее скорости. Естественным же следствием увеличения инерции является замедление всех происходящих процессов. Таким образом с чисто физической точки зрения движущийся человек живет медленнее, чем покоящийся. Его цикл питания и усталости, быстрота реагирования на внешнее раздражение, развитие тела от молодости до старости, те материальные процессы в мозгу, которые так или иначе играют роль в возникновении мыслей и чувств, тикание часов в жилетном кармане— все это замедляется в определенном отношении. При очень большой скорости движения покоящийся индивидуум может достичь 70 лет в то время, как движущемуся исполнится всего 1 год. Его аппетита хватило всего только на 365 завтраков, обедов и т. д.; мыслительная работа его интеллекта, скованного медленно работающим мозгом, могла быть проделана за 1 год земной жизни. Об этом свидетельствует и более точный научный инструмент—его часы.

Исходя из того грубого представления о времени, которое коренится в нашем сознании (а только исходя из него, и можно утверждать, что время не связано

с пространством), нужно заключить, что наши два наблюдателя прожили разные промежутки времени между первой и второй своей встречей.

Ссылка на субъективное время осложняется тем фактом, что в счет его легко могут вкратиться ошибки. „Для одного время бежит, для другого идет шагом, для третьего скачет, а для четвертого совсем стоит на месте“. Конечно, я не имел в виду эти чисто индивидуальные особенности. Вообще я не особенно охотно воспользовался таким несовершенным счетчиком времени, как наше субъективное чувство. Но я должен был ответить критику, который апеллировал к тому, что он чувствует „всеми фибрами своего существа“, и указать ему, что основой этого чувства является время, прожитое данным субъектом, которое, как мы видели, для одного человека может равняться 70 годам, а для другого—одному году. Отсчет „прожитого времени“ можно вести более научным способом—при посредстве часов, следующих за данным субъектом, инерция которых меняется в зависимости от его скорости. Но сделать это „прожитое время“ общепринятым не представляется возможным. В самом деле, хотя каждому человеку было бы удобно иметь свое собственное время, в точности пропорциональное прожитому им времени, это было бы весьма неудобно с точки зрения выдачи ему жалования. Поэтому-то Королевская обсерватория и выработала всеобщую систему отсчета времени, не совсем совпадающую с временем, прожитым каждым данным человеком. Согласно этой системе величина промежутка времени не зависит от того, каким образом двигался за это время рассматриваемый предмет. Правда, такой отсчет времени несколько невыгоден для нашего возвратившегося путешественника, которого придется считать 70-летним, хотя по всем видимостям он будет похож на младенца, еще не вылезшего из пеленок. Но на эту жертву он должен пойти во

имя общего блага. На практике нам не приходится иметь дела с очень быстро движущимися людьми, но зато мы встречаемся с бешено мчащимися атомами и электронами, так что вопрос о выборе между собственной и всеобщей системой отсчета времени имеет большое практическое значение.

Таким образом, говоря о физическом времени (т. е. о времени Королевской обсерватории), можно утверждать, что промежуток между двумя встречами одинаков для обоих встречающихся, независимо от того, согласуется ли это с фактическим опытом или нет. Именно это систематическое отклонение физического времени от непосредственно наблюдаемого и вызывает объединение времени с пространством (которое при точном совпадении физического времени с непосредственно наблюдаемым было бы, разумеется, невозможно). Физическое время, подобно пространству, есть своего рода система отсчета, в которой мы располагаем события внешнего мира. Рассмотрим теперь, как фактически располагаются события в пространственно-временной системе отсчета. Так как таких систем бесчисленное множество, то я буду для определенности говорить о расположении событий в моей системе отсчета.

РАСПОЛОЖЕНИЕ СОБЫТИЙ

Рис. 1 представляет ряд событий, обозначенных кружками, правильное расположение которых еще не установлено. Моя задача заключается в том, чтобы найти место каждого события в моей пространственно-временной системе отсчета. Среди этих событий я могу сейчас же выделить и отметить событие *Здесь-Теперь*, т. е. то, которое происходит в этой комнате в данный момент. Остальные события находятся на известных расстояниях от *Здесь-Теперь*, причем эти расстояния разнятся не только по величине, но и

по типу. Часть событий принадлежит тому, что я называю *Прошедшим*, часть относится к *Будущему*,

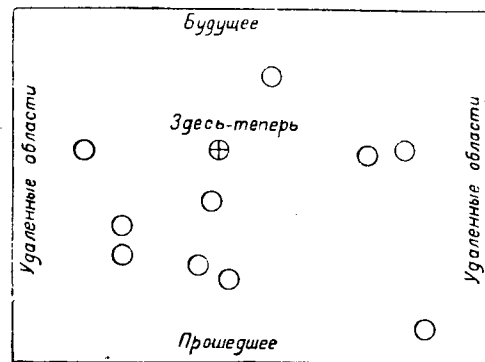


Рис. 1.

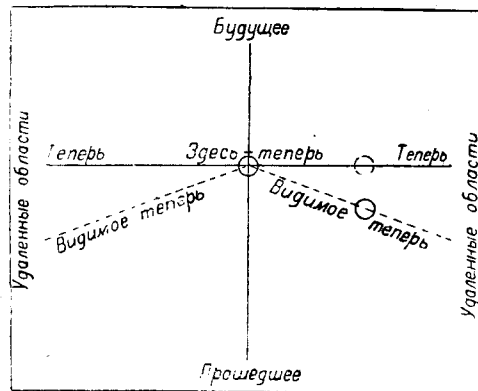


Рис. 2.

наконец часть происходит где-нибудь в Китае или в Перу—в *Удаленных* от меня пространственных областях. На данном чертеже можно изобразить только

одно измерение пространства, второе направлено перпендикулярно чертежу, третье же каждый должен стараться мысленно себе представить.

Перейдем теперь к более точной схеме расположения событий. Прежде всего нужно установить, какое место на чертеже занимаю *Я* сам. Такая постановка вопроса отдаст эгоцентризм, но нужно помнить, что дело происходит в моей системе отсчета, где все вертится вокруг меня. В ней я имею вид своего рода четырехмерного червя (рис. 2). В самом деле, я имею довольно значительную протяженность в сторону *Прошедшего* и, возможно, в сторону *Будущего* и сравнительно небольшую протяженность в сторону *Удаленных областей* пространства. В данный момент времени я совпадаю с событием *Здесь-Теперь*.

Наблюдая мир с точки зрения *Здесь-Теперь*, я вижу целый ряд других событий. Это наталкивает меня на мысль, что в данный воспринимаемый мною момент времени происходят и другие события, т. е. то, что *Теперь* не ограничено точкой *Здесь-Теперь*. Исходя из этого, я провожу через мир событий сечение *Теперь* и помещаю на нем все те происходящие в различных местах пространства события, которые я сейчас вижу. Получающееся сечение я называю моментом времени или „мгновенным состоянием мира“. Я располагаю на *Теперь* те события, которые мне кажутся происходящими теперь.

Таким методом расположения событий в пространственно-временной схеме пользовались до 1667 г., когда впервые была обнаружена его несостоятельность. В этом году астроном Ремер открыл, что видимое теперь вовсе не происходит в момент *Теперь* (иначе говоря, что распространение света требует времени). До тех пор мы смешивали два совершенно различных события: 1) первоначальное событие, происходящее где-то во внешнем мире, и 2) наше восприятие этого события. Второе из них происходит

Здесь-Теперь, первое же ни здесь, ни теперь. Таким образом опыт обнаруживает только те, происходящие *Теперь* события, которые находятся здесь. Отсюда можно было бы заключить, что вообще никакого мгновенного состояния мира *Теперь*, кроме события *Здесь-Теперь*, не существует. Однако физики очень привыкли к понятию мгновенного состояния мира и не захотели отказаться от него. И, действительно, это понятие может принести большую пользу, если только не рассматривать его как нечто сверхъестественное. Поэтому на чертеже была оставлена линия *Теперь*, по сторонам ее проведены две новые линии *Видимое Теперь*, на которых помещаются видимые в данный момент события. Котангенс угла между прямыми *Видимое Теперь* и прямой *Теперь* есть скорость света.

Таким образом когда я вижу, что в определенной части вселенной происходит какое-нибудь событие, например возникновение новой звезды, я помещаю его на линию *Видимое Теперь*. Затем, зная параллакс этой звезды и произведя некоторые вычисления, я определяю, что моя линия *Теперь* проходит, скажем, на 300 лет ближе ко мне, чем это событие (300 же лет назад, линия *Теперь* проходила через само это событие). С помощью этого метода я могу распределить все события по линии *Теперь*, т. е. по мгновенным состояниям мира, и построить систему временного отсчета для внешнего мира. Когда эта задача будет закончена, вспомогательные линии *Видимое Теперь* могут быть стерты с чертежа.

Итак, мы рассмотрели, каким образом *Я* располагаю события, обратимся теперь к вам. Прежде всего надо определить ваше место на чертеже (рис. 3). Примем, что вы находились на другой звезде, скорость которой отлична от скорости Земли, но которая в данный момент проходит как раз мимо Земли. Таким образом я разлучен с вами в прошлом и в будущем, но оба

мы находимся в точке *Здесь-Теперь* (как изображено на чертеже). Оба мы наблюдаем мир с этой точки и, конечно, видим каждое событие одновременно. Правда, благодаря тому, что наши различные скорости вызывают различные доплер-эффекты, фитц-джеральдовы сокращения и т. д., мы воспринимаем эти события по-разному. То, что вы воспринимаете как красный квадрат, мне может казаться зеленым прямоугольником и т. п. На этой почве у нас могут возникнуть

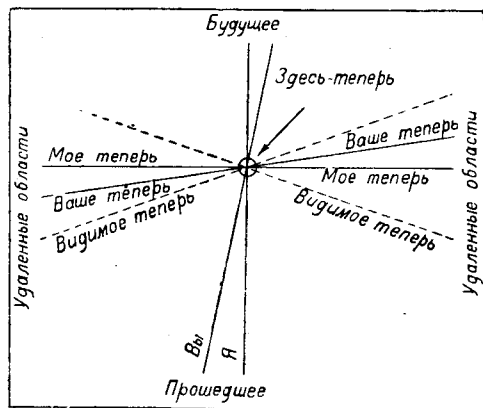


Рис. 3.

недоразумения. Но тем не менее мы все же наблюдаем одни и те же события, и мои линии *Видимого Теперь* в точности совпадают с вашими. Исходя из этих линий, вы можете путем вычислений определить, через какие события проходит ваша линия *Теперь*. Она показана на рис. 3.

Почему же, несмотря на то, что *Видимое Теперь* одинаково для нас обоих, ваша линия *Теперь* не совпадает с моей? Это объясняется тем, что в наши вычисления входит непосредственно измеряемая вели-

чина—скорость света. Естественно, что каждый из нас исходит из результатов своих измерений; причем вследствие фитц-джеральдовых сокращений и т. д. вовсе не обязательно ожидать совпадения этих результатов. Как это ни странно, скорость света все же оказывается для нас обоих одинаковой и равной 299 796 км/сек. Под этим кажущимся согласием кроется, однако, разногласие, так как вы считаете, что эта цифра дает скорость света по отношению к вашей планете, я же рассматриваю ее как скорость света по отношению к Земле¹. Таким образом наши вычисления не сходятся друг с другом, и ваша линия *Теперь* получается отличной от моей.

Если бы мы приписывали мгновенным состояниям мира какое-то самостоятельное объективное значение, то на этой почве между нами возник бы неразрешимый спор.

Мне показалось бы смешным, что вы берете ряд событий на правой стороне чертежа, которые уже прошли, и ряд событий на левой стороне, которые еще не наступили, и говорите, что они соответствуют состоянию вселенной в данный момент. Вы бы также издевались над моей схемой расположения событий. Мы никогда бы не смогли прийти к соглашению. Правда, на чертеже моя линия *Теперь* выглядит более естественной, чем ваша, но это объясняется тем, что чертеж делал я. Вы бы, конечно, провели свою линию *Теперь* перпендикулярно вашей линии.

¹ Непосредственно измеряемая скорость света есть, строго говоря, среднее значение скорости света по двум прямо противоположным направлениям. Скорость же света по одному направлению может быть измерена только после установления линий *Теперь* и потому сама не может служить для их установления. Поэтому для проведения линий *Теперь* необходимо ввести определенное допущение, и эти линии являются в известной мере условными. Обычно предполагается, что скорость света (по отношению к наблюдателю) по двум противоположным направлениям одинакова.

Если же принять, что линии *Теперь* суть просто координатные оси (подобно меридианам и параллелям на Земле), проведенные через мир, для того чтобы было яснее видно расположение событий, то всякий повод для спора отпадает. Вопрос о том, правильно или неправильно проведены эти линии, не имеет смысла,—речь может идти лишь о том, насколько они удобны. Мгновенные состояния мира не имеют никакого реального значения в абсолютной структуре вселенной. Они служат только для целей воображаемого распределения событий. До сих пор мы привыкли считать мир (в его длительности) как бы расслоением на свои мгновенные состояния. Но наблюдателю на другой звезде эти слои кажутся проходящими по другому направлению. Поэтому реальный механизм физического мира станет для нас гораздо яснее, если мы освободимся от этого мысленного расслаивания. Хотя этот механизм и покажется нам на первых порах странным, он, по сути дела, значительно проще, чем наши прежние представления. То, что на первый взгляд кажется простым, может быть в действительности очень сложным, и наоборот. Мы привыкли наблюдать свинью в виде котлет, биологу же кажется более простой неразрезанная свинья, по виду которой можно определить ход ее жизненных функций.

АБСОЛЮТНОЕ ПРОШЕДШЕЕ И БУДУЩЕЕ

Постараемся теперь стать на абсолютную точку зрения. Для этого нужно стереть все линии *Теперь*, а также вашу и мою линии (поскольку мы уже не приписываем себе существенной роли во вселенной). Остаются только линии *Видимого Теперь*. Эти линии являются абсолютными, поскольку они одинаковы для всех наблюдателей, находящихся в точке *Здесь-Теперь*. Наш чертеж представляет собой только сечение мира (на нем не хватает двух измерений). В частности угол,

образованный линиями *Видимое Теперь*, есть в действительности конус; точнее, если продолжить эту линию в *Будущее*,—двойной конус, т. е. нечто подобное песочным часам (рис. 4). Совокупность этих песочных часов (проведенных через все точки мира, рассматриваемые как точки *Здесь-Теперь*) и характеризует абсолютную пространственно-временную структуру мира. Каждый конус представляет собою как бы „ствол“ вселенной.

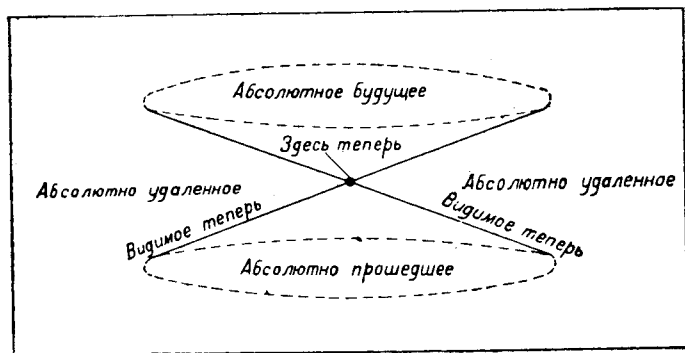


Рис. 4.

Время обычно рисуют в виде старика с косою и песочными часами. Теперь мы уже не даем ему двигать мировые мгновения своей косою, но попрежнему оставляем у него песочные часы. Поскольку эти песочные часы являются абсолютными, образующие их конусы ограничивают области *Абсолютного Будущего* и *Абсолютного Прошедшего* (по отношению к событию *Здесь-Теперь*). Между этими областями лежит клинообразная нейтральная зона, которая (абсолютно) не является ни будущим ни прошедшим.

Часто говорят, что теория относительности переворачивает вписз головой и будущее и прошедшее. Это совершенно не верно. Но в противоположность

относительному будущему и прошедшему, абсолютное будущее и абсолютное прошедшее разделены не одной только бесконечно узкой полосой настоящего, а целой областью. Эту нейтральную область можно было бы назвать *Абсолютным Настоящим*, но я не являюсь сторонником этого термина. Гораздо больше здесь подходит термин *Абсолютно Удаленное*. Мы уничтожили линии *Теперь*, и в нашем абсолютном мире настоящее сводится к одной точке *Здесь-Теперь*.

Положение, создающееся благодаря существованию этой нейтральной зоны, можно пояснить следующим воображаемым примером. Допустим, что вы влюблены в одну из обитательниц Нептуна и пользуетесь взаимностью с ее стороны. Тяжесть разлуки для вас несколько смягчилась бы, если бы вы могли в какой-нибудь, хотя бы специально выбранный момент времени сказать себе: „Вот сейчас она думает обо мне“. К несчастью, нам пришлось отказаться от понятия *Теперь*. *Абсолютного Теперь* не существует—существуют только различные относительные *Теперь*, соответствующие системам отсчета различных наблюдателей и заполняющие всю нейтральную зону, ширина которой у Нептуна достигает 8 часов. В силу этой относительности вашей возлюбленной пришлось бы думать о вас 8 часов подряд.

Для самых больших расстояний на Земле ширина нейтральной зоны не превышает десятой доли секунды, так что ход земных событий ею серьезно затрагивается. Кроме того, наше утверждение, что абсолютное настоящее сводится к точке *Здесь-Теперь*, справедливо только для мгновенных (точечных) событий. Наблюдаемые же нами в действительности события всегда имеют известную конечную продолжительность. Если эта продолжительность превышает ширину нейтральной зоны, то все событие в целом можно считать происходящим абсолютно *Теперь*. С этой точки зрения „современность“ события есть

как бы тень, отбрасываемая им на пространство, причем чем продолжительнее событие, тем дальше простирается эта тень.

По мере того как скорость материи приближается к скорости света, масса ее стремится к бесконечности. Поэтому придать материальному телу скорость большую, чем скорость света, невозможно. Это следует из классических законов физики; помимо того, факт возрастания массы со скоростью был установлен на целом ряде опытов. В абсолютном мире формулировка этого закона сводится к тому, что материальная частица из точки *Здесь-Теперь* может двигаться только по направлению к *Абсолютному будущему* (как и следовало ожидать). Она не может попасть в нейтральную зону. Пограничный конус характеризует движение светового луча или вообще тела, движущегося со скоростью света. Поскольку мы всегда связаны с материальными телами, мы постоянно стремимся к *Абсолютному будущему*.

Событие в *Абсолютном Будущем* не всегда (т. е. абсолютно) пространственно удалено от нас. Наблюдатель из точки *Здесь-Теперь* может достичь любого из этих событий, так как для этого требуется скорость меньшая, чем скорость света. По отношению к системе отсчета этого наблюдателя данное событие будет находиться *Здесь*. Событий же в нейтральной зоне ни один наблюдатель не может достичь, поскольку для этого требуется недостижимо большая скорость. Эти события не находятся *Здесь* ни для одного наблюдателя (из точки *Здесь-Теперь*), следовательно, они абсолютно удалены от нас.

АБСОЛЮТНОЕ РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ ПРОСТРАНСТВОМ И ВРЕМЕНЕМ

Итак, мы разделили мир на *Абсолютное Прошедшее* и *Будущее*, с одной стороны, и *Абсолютно Уда-*

ленное—с другой. Тем самым мы установили фундаментальное различие между временем и пространством, которое не зависит от выбора системы пространственного отсчета и проявляется существованием временно-подобных и пространственно-подобных интервалов. События могут быть разделены или временно-подобным (т. е. лежащим в абсолютно прошедшем или будущем) или пространственно-подобным (т. е. лежащим в абсолютно удаленном) интервалом. Первые заполняют конусы прошедшего и будущего, вторые—нейтральную зону. Они абсолютно отделены друг от друга линиями *Видимое Теперь*, представляющими собою как бы ствол абсолютной структуры мира. Именно в этом лежит корень различия между временем и пространством, найти который оказалось возможным, только отказавшись от отождествления времени с искусственными линиями *Теперь*.

Я хочу обратить ваше внимание на существенную разницу между тем, как мы воспринимаем временную и пространственную протяженность. Как уже было указано выше, наш путь идет в абсолютное будущее, т. е. через последовательность временно-подобных интервалов. Непосредственное же восприятие последовательности пространственно-подобных интервалов для нас невозможно, поскольку оно потребовало бы движения со скоростью большею, чем скорость света. Все наши сведения о пространственно-подобных интервалах, подобно вообще подавляющему большинству наших сведений о внешнем мире, получены косвенным путем, т. е. путем сравнения и интерпретации ощущений, получаемых нашими органами чувств. Такого же рода косвенные сведения мы получаем и о временно-подобных интервалах между событиями внешнего мира. Но, помимо этого, мы непосредственно воспринимаем и прожитые нами самими временно-подобные интервалы. Поэтому по-

нятие о времени имеется в нашем мозгу и независимо от деятельности внешних органов чувств. Когда я закрываю глаза и стараюсь углубиться в себя, я воспринимаю свою длительность, а не свою протяженность. Характерным признаком времени является его существование „внутри нас“, а не только в событиях внешнего мира; пространство же мы всегда воспринимаем как нечто лежащее вне нас.

ЧЕТЫРЕХМЕРНЫЙ МИР

Я не знаю, сознаете ли вы, что все наши последние рассуждения относятся по сути дела к четырехмерному миру. Четвертое измерение не пришлось даже специально вводить,—оно было уже налицо, как только мы начали говорить о событиях. В самом деле, события представляют собою четырехмерную последовательность, которую можно делить на части рядом способов: на правые и левые, на передние и задние, на верхние и нижние, на более поздние и более ранние. В понятии четвертого измерения нет ничего трудного; более того, расположение событий вообще можно представить себе только в четырех измерениях. Затруднения начинаются только при дальнейшем развитии этой мысли, так как в нас чрезвычайно глубоко укоренилась привычка делить весь мир событий на трехмерные сечения-мгновения как нечто отличное от остальных трех измерений. Отсюда возникла обычная картина трехмерного мира, уносимого потоком времени. Это выделение одного из четырех измерений не было лишено известного смысла,—в этой грубой форме мы воспринимаем факт действительного различия между временно-подобными и пространственно-подобными интервалами. Выше было показано, как это различие можно выразить более точно. Воображаемое сечение *Теперь* отделяет одно измерение от остальных трех; абсолют-

ные же конусы прочно связывают друг с другом все четыре измерения¹.

Мы привыкли представлять себе человека независимо от его деятельности. Когда я изобразил *Себя* на рис. 2, вам показалось странным, что я включаю сюда свое детство и старость. Но представление о человеке без прошлого и будущего так же абстрактно, как представление о человеке без внутренностей. Абстракции иногда бывают полезны; в частности понятие человека без внутренностей (т. е. понятие поверхности) широко используется геометрией. Но всегда нужно отличать абстракцию от действительности. „Четырехмерный червь“, о котором говорится в этой главе, многим, наверно, показался ужасно абстрактным. В действительности же это понятие совсем не абстрактно, а просто непривычно. Наоборот, абстракцией является трехмерное сечение этого червя (т. е. человек в данный момент). А так как сечения можно проводить по различным направлениям, то для различных наблюдателей абстрагирование дает неодинаковые результаты. Эту разницу каждый наблюдатель приписывает фиду-джеральдову сокращению. Таким образом неабстрактным является только человек, обладающий протяженностью во времени.

Понятие четырехмерного мира было в этой связи впервые введено Минковским. Эйнштейн обнаружил относительность обычно употребляющихся в физике величин; Минковский же показал, как можно снова получить абсолютное путем более глубокого исследования четырехмерного происхождения этих величин.

¹ Масштаб на рис. 4 выбран так, что в 1 сек. соответствует 103 000 км. Если пользоваться более обычным масштабом (например 1 сек. на ярд), то линии *Видимого Теперь* сделаются почти горизонтальными. Отсюда понятно, почему конусы, связывающие все четыре измерения, обычно принимают за плоские сечения, разделяющие их.

СКОРОСТЬ СВЕТА

Характерной чертой теории относительности, возбуждавшей большой интерес у философов, является абсолютность скорости света. Вообще говоря, всякая скорость относительна. Говоря, что данная скорость равна 40 км/сек, я должен непременно добавить: „по отношению к Земле“, или „по отношению к Арктуру“, или по отношению к какому-нибудь другому телу отсчета. Без такого добавления мое утверждение не имеет никакого смысла. Когда же речь идет о скорости в 299 796 км/сек, то всякие пояснения становятся излишними. Эта скорость одна и та же по отношению к любой звезде или частице материи.

Догнать световой сигнал невозможно,—как бы быстро вы ни двигались, он будет удаляться от вас с неизменной скоростью 260 000 км/сек. Природа приносит нам здесь жестокое разочарование. Возьмем снова нашего знакомого наблюдателя со скоростью 260 000 км/сек и пошлем его вдогонку за световым сигналом. С нашей точки зрения свет будет обгонять всего на 40 000 км/сек; однако для самого наблюдателя дело будет обстоять иначе. Благодаря сокращению его масштаба и замедлению хода часов, каждый наш километр будет для него соответствовать полкилометру, каждая наша секунда—2 секундам. Поэтому согласно его измерениям скорость света будет равна 150 000 км/сек (по-нашему: 0,75 км в 2 сек.). Далее, он делает ошибку в синхронизации тех часов, которыми он мерит свою скорость (надо помнить, что его линия *Теперь* отлична от нашей). В результате световой сигнал будет ему казаться удаляющимся со скоростью 300 000 км/сек. Таким образом со своей собственной точки зрения наш наблюдатель будет безнадежно отставать от света, так как благодаря изменениям в измерительных приборах он никогда не сможет обнаружить свое приближение к нему.

Заметим, что это ускользание светового сигнала совершенно не похоже на общеизвестное ускользание радуги.

Эти рассуждения в известной мере объясняют абсолютность скорости света, которая с первого взгляда совершенно непонятна. Более глубокое ее объяснение в следующем. Мы уже говорили, что линия *Видимое Теперь*, соответствующая движению светового сигнала, есть как бы ствол всей структуры вселенной. Особенность скорости в 299 796 км/сек заключается в том, что она совпадает с этим мировым стволом. Четырехмерные черви, изображающие материальные тела, проникают через этот ствол в конус будущего. Их расположение нужно, разумеется, относить к какой-то системе отсчета. Световой же сигнал идет вдоль самого ствола, и потому движение его можно описать и независимо от выбора системы отсчета.

Мировой ствол характеризуется числом 299 796 км/сек. Прорезывающим его по различным направлениям „червоточинам“ соответствуют другие числа. Все они зависят от выбора пространственно-временной системы отсчета; только число, характеризующее ствол, одинаково для всех систем отсчета. Это, разумеется, не случайность, но я не думаю, чтобы отсюда можно было сделать какие-нибудь особенно глубокие заключения, кроме, пожалуй, того, что наши измерения построены рационально и дают возможность обнаружить не только случайные, но и основные черты структуры вселенной.

Скорость 299 796 км/сек, одинаковая для всех систем отсчета, обычно носит название скорости света. Но ее значение гораздо шире—при такой скорости масса материального тела возрастает до бесконечности, длина его сокращается до нуля, часы останавливаются. С этой скоростью мы встречаемся в любой проблеме, даже и не имеющей никакого отношения к распространению света.

С научной точки зрения факт абсолютности скорости света представляет большой интерес. С философской же точки зрения этот интерес был, по моему мнению, в значительной мере преувеличен. Абсолютная скорость света в науке означает только то, что эта скорость выражается одним и тем же числом в различных системах отсчета. Этим чисто условным обстоятельством наука подчеркивает универсальное значение скорости света¹.

Если же говорить не о результатах измерений, а о выражаемой ими действительности, то нужно сказать, что как „ствол“, так и „червоточины“ (т. е. материальные частицы) представляют собою абсолютные признаки мирового дерева. Разница здесь только та, что ствол имеет существенное и универсальное, а червоточина—случайное значение.

Часто возникают недоразумения и по вопросу существования верхнего предела скорости. Нельзя сказать, что скорость не может превысить 299 796 км/сек. В самом деле, представим себе, например, прожектор, посылающий параллельный пучок лучей на расстояние от Земли до Пептуна. Если этот прожектор начнет вращаться со скоростью хотя бы одного оборота в минуту, то отдаленный конец пучка будет двигаться по кругу со скоростью, на много превышающей скорость света. Этот пример является характерным для нашей привычки создавать воображаемые скорости, связывая между собою мысленно ряд событий, не находящихся по существу в прямой причинной связи друг с другом. Утверждение теории относительности к этим скоростям не относится. Оно говорит только, что ни материя, ни энергия, ни вообще что-либо, могущее служить в качестве сигнала, не

¹ В системах отсчета, употребляемых общей теорией относительности (гл. IV), скорости света не приписывается постоянное значение, хотя она и продолжает служить характерным признаком ствола структуры вселенной.

может двигаться быстрее, чем со скоростью 299 796 км/сек, отнесенной к рассмотренным в этой главе пространственно-временным системам отсчета.

Скорость света в материи может при известных обстоятельствах (именно при аномальной дисперсии) превысить это значение. Но для этого свет должен пройти через известный слой материи и вызвать в молекулах резонансные колебания, вторичное излучение которых и вызывает увеличение скорости распространения. Таким образом для получения скорости, превышающей 299 796 км/сек, требуются известные предварительные приготовления, и потому она не может служить для сигнализирования.

Существование верхнего предела скорости сигнализирования имеет большое значение. Благодаря ему мы можем посылать сигналы только в *Абсолютное Будущее*. Возможность сообщать о событиях, происходящих *Здесь-Теперь*, в нейтральную зону привела бы к чрезвычайно странным последствиям (если оставаться на почве принципа относительности и не выделять особо той части нейтральной зоны, куда могут быть переданы сигналы). Например, наш союзник сегодня мог бы получить и сегодня же послать нам обратно те сообщения, которые мы должны были бы ему послать только завтра.

Ограничение скорости распространения сигналов предохраняет нас от того смешения прошедшего с будущим, в котором часто несправедливо упрекают теорию Эйнштейна. На первый взгляд существование верхнего предела для скорости сигнализирования кажется ничем не оправданным капризом природы. Хочется во что бы то ни стало найти что-нибудь делающее больше, чем 299 796 км/сек. Будучи же

выражено в абсолютной форме (т. е. в форме невозможности сигнализирования вдоль пространственно-подобных интервалов), это утверждение сразу приобретает рациональный смысл. Существование сигнала со скоростью распространения большей, чем скорость света, хотя бы на 1 км/сек, стерло бы различие между пространством и временем, которое, как мы все твердо убеждены, должно быть учтено во всякой теории.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Задачей настоящих лекций является главным образом изложение основных идей новых теорий, а не их практических применений. Однако рассмотрение одних только фундаментальных концепций может вызвать впечатление, будто новая физика в значительной мере „висит в воздухе“. Это ни в какой мере не верно. В частности, теория относительности служит рабочим орудием в целом ряде физических проблем. Я смогу привести здесь лишь две совсем элементарных проблемы, на которых далеко не в полной мере выявляется мощная сила теории относительности как орудия научного исследования.

1. Часто указывалось, что движение звезд должно мало-помалу замедляться вследствие реакции их собственного излучения. В самом деле, при движении звезды плотность ее излучения спереди увеличивается, а сзади уменьшается. Благодаря этому возникает избыток давления излучения на переднюю сторону звезды, т. е. появляется сила, стремящаяся остановить звезду. Этот эффект должен был бы оказывать большое влияние на движение небесных тел. В частности благодаря ему старые звезды должны были бы в среднем двигаться медленнее, чем молодые. Однако наблюдения не подтверждают этого вывода.

Возникающее затруднение легко разрешается тео-

¹ Последняя оговорка необходима, так как, например, в системе отсчета, которая вращается вместе с Землей, звезды каждый день описывают круги с громадными скоростями.

рией относительности, согласно которой „прекращение движения“ вообще не имеет смысла. Уменьшение скорости по отношению к одной системе отсчета может сопровождаться увеличением ее по отношению к другой системе. Поскольку нельзя говорить ни об абсолютном движении, ни об абсолютном покое, вышеприведенное утверждение нужно просто отбросить как бессодержательное.

2. β -частицы, испускаемые радиоактивными телами, представляют собою электроны, скорость которых не на много меньше скорости света. Опыт показывает, что масса каждого из таких быстро движущихся электронов значительно больше массы покоящегося электрона. Теория относительности объясняет это увеличение и дает формулу, выражающую зависимость массы от скорости. Возрастание массы со скоростью объясняется просто относительностью массы, которая, по определению, зависит от двух относительных величин—длины и времени. В самом деле, постараемся стать на точку зрения самой β -частицы. Она представляет собой самый обыкновенный электрон, ничем не отличающийся от других. Но ведь она движется с необычайно большой скоростью? „Ничего подобного,—отвечает электрон,—это только так кажется. Я с удивлением вижу, что вы проносите мимо меня с бешеной скоростью в 150 000 км/сек. Я и не представляю себе, как можно двигаться так быстро. Однако это не мое дело“. Таким образом β -частица, чувствуя себя в покое, решает не обращать внимания на наше движение и приписывает себе обычную массу, радиус и заряд. Со своей точки зрения она имеет обычную массу электрона, равную $9 \cdot 10^{-28}$ г. Но масса и радиус суть относительные величины. В данном случае они, очевидно, отнесены к системе отсчета, покоящейся относительно электрона. Когда же мы говорим о массе, мы, очевидно, подразумеваем ее значение в системе отсчета, покоя-

щейся относительно нас. Пользуясь четырехмерной геометрией, можно вычислить изменение массы при переходе от одной системы отсчета к другой (оно связано с изменениями длины и времени). Это вычисление показывает, что масса увеличивается в таком же отношении, в каком уменьшается длина (фитцджеральдов фактор). Итак, наблюдаемое нами возрастание масс вызывается переходом от собственной системы отсчета электрона к нашей системе отсчета.

Со своей собственной точки зрения все электроны одинаковы. Кажущиеся различия между ними получаются только потому, что мы помещаем всех их в свою систему отсчета. Масса электрона кажется нам большей, чем самому электрону, причем это увеличение растет при возрастании разницы между нашей и его системой отсчета, т. е. при возрастании относительной скорости.

Мы приводим результаты не для того, чтобы доказать справедливость новой теории, а для того чтобы продемонстрировать ее целесообразность. Оба вышеприведенные результата могли бы быть получены из классической электромагнитной теории в соединении с некоторыми естественными пограничными условиями на поверхности электрона (эти условия необходимы только для решения второй проблемы). Но для того, чтобы стала ясна польза новой теории, нужно рассмотреть не что могло бы быть, а что практически было выведено из классической теории. Историческое дело обстояло так, что к первой проблеме классическая теория была применена неверно,—в вычислении не был учтен один существенный компенсирующий фактор. Что же касается второй проблемы, то там после нескольких неудачных попыток был в конце концов получен правильный результат. Но поскольку этот результат был выведен из электромагнитных уравнений, его считали следствием электрической структуры электрона и под-

тверждением той гипотезы, что электрон состоит из чистого электричества. Наше же рассуждение совершенно не связано с представлениями о структуре электрона и основывается исключительно на относительности масс. Поэтому хотя и есть целый ряд доводов, позволяющих думать, что электрон целиком состоит из отрицательного электричества, факт возрастания массы со скоростью ничего не может прибавить к этим доводам.

РЕЗЮМЕ

В настоящей главе идея о множественности систем пространственного отсчета была распространена на пространственно-временные системы отсчета. Система расположения предметов в пространстве является только частью общей системы расположения событий в пространстве и во времени. Природа не дает никаких указаний на то, какую из этих систем отсчета нужно предпочесть. Та система отсчета, относительно которой мы находимся в покое, обладает по отношению к нам (в отличие от других систем) известной симметрией; поэтому-то мы и считали ее все время единственно правильной и рациональной. Однако такая эгоцентристская точка зрения должна быть оставлена, и все системы отсчета нужно рассматривать как равноправные. Эта множественность систем отсчета делается понятной при совместном рассмотрении пространства со временем; она соответствует различным направлениям сечений четырехмерного мира событий, каждое из которых представляет собою „мировое мгновение“. При этом оказывается, что одновременность (*Теперь*) относительна. Относительность одновременности тесно связана с относительностью скорости. Существование абсолютной скорости позволило бы нам утверждать, что некоторые события в прошедшем и в будущем происходят *Здесь*, но не

Теперь, существование же абсолютной одновременности позволило бы утверждать, что некоторые события происходят *Теперь*, но не *Здесь*. Отбросив эти искусственно проводимые сечения, мы рассмотрели абсолютную структуру мира, характеризуемую расходящимся конусом, имеющим форму песочных часов. Изучение этой структуры дало нам возможность установить абсолютное различие между временно- и пространственно-подобными интервалами—различие, которое оправдывает и объясняет наши инстинктивные представления о времени как о чем-то глубоко отличном от пространства. Многие из применений новой теории к практическим проблемам физики носят очень частный характер и потому не рассматриваются в настоящей книге. Наиболее простым из этих применений является определение зависимости свойств физических объектов от их скорости. Поскольку движение предмета по отношению к наблюдателю может быть с точно таким же правом интерпретировано как движение наблюдателя по отношению к предмету, то оно не оказывает никакого влияния на абсолютное поведение предмета. Кажущиеся изменения длины, массы, электрического и магнитного поля, периода колебаний и т. д. вызываются просто переходом от системы отсчета, покоящейся по отношению к предмету, к системе отсчета, покоящейся по отношению к наблюдателю. Формулы, выражающие эти кажущиеся изменения, можно легко вывести, зная геометрическую связь между различными системами отсчета.

Глава IV. ЗАКОНЫ ТЯГОТЕНИЯ

„Вы иногда говорите о тяготении как о существенном и неотъемлемом свойстве материи. Прошу вас, не приписывайте этой точки зрения мне. Истинная природа тяготения мне неизвестна, и рассмотрение ее потребовало бы много времени...

Тяготение обуславливается существованием какого-то агента, действующего все время сообразно каким-то определенным законам. Но вопрос о том, материален или нематериален этот агент, я предоставлю решать своим читателям“.

Ньюто́н, „Письма к Бенгли“

ЧЕЛОВЕК В ЛИФТЕ

В 1915 г. Эйнштейн расширил теорию относительности, распространив ее на неравномерные движения. К этому вопросу легче всего подойти, рассмотрев один частный пример—человек в лифте.

Представьте себе, что эта комната есть лифт. Канат порвался, и мы летим вниз со все возрастающей скоростью сообразно законам свободного падения.

Займемся производством физических опытов. Пусть лифт послужит нам лабораторией, работая в которой мы постараемся открыть законы природы. Иначе говоря, исследуем, как выглядит природа с точки зрения человека в лифте. В значительной мере это будет повторением научных исследований, произведен-

ных в лабораториях на „твердой почве“. Но наряду с этим получится и известная разница.

Я держу в руке яблоко и выпускаю его. Яблоко не может упасть так, как оно уже падало и раньше. В самом деле, ведь наш лифт и все находящиеся в нем вещи падаются в состоянии свободного падения. Поэтому яблоко повиснет у моей руки. При научных исследованиях в лифте не повторится один случай, имевший место в истории земной науки,—случай с Ньютоном и его яблоком. Грандиозная концепция единого агента,двигающего звезды и заставляющего падать яблоки, рушится, так как самый обычный опыт показывает, что в оборвавшемся лифте яблоки не падают.

Разумеется, во всех других отношениях научные исследования в лифте приведут к установлению тех же законов, которые были открыты в более обычных условиях. Люди в лифте откроют те же законы и в той же форме, как их открыли мы. В их схеме будет отсутствовать только сила, заставляющая падать яблоки.

Допустим, что наши наблюдатели в лифте наделены обычными эгоцентристскими качествами и считают естественной только свою точку зрения на мир. Им вовсе не кажется странным проводить свою жизнь в непрерывном падении; наоборот, они думают, что странно все время торчать на поверхности Земли. Поэтому если даже они и обнаружат, что с точки зрения поддерживаемых Землей существ яблоки обладают странным свойством падать, они так же мало примут наши опыты всерьез, как мы до сих пор принимаем их опыты.

Должны ли мы относиться к их опытам всерьез? Иначе говоря, каково сравнительное значение законов природы, найденных наблюдателями в падающем лифте, и законов природы, найденных наблюдателями на „твердой почве“? Какие из них правильнее? Имеют

ли одни превосходство перед другими? Ясно, что разницы между этими двумя схемами законов природы объясняется тем, что они отнесены к различным пространственно-временным системам отсчета. Наша система отсчета покоится относительно Земли, а их система отсчета — относительно лифта. С наблюдателями, употребляющими различные системы отсчета, мы встречались и раньше, но тогда относительная скорость наблюдателей была постоянной. Скорость же лифта непрерывно растет. Можно ли сказать, что и все ускоренные системы отсчета равноправны, т. е. что Природа не оказала предпочтения ни одной из них? Я думаю, что можно. Единственное сомнение, которое здесь возникает, заключается в том, не должны ли мы оказать предпочтение системе отсчета человека в лифте перед нашей системой отсчета.

В самом деле, когда мы стоим на Земле, молекулы Земли все время поддерживают нас, непрерывно ударяя о подошвы наших сапог с силой, равной примерно весу десяти камней. Иначе мы бы упали через промежутки в полу. Мы все время находимся под действием сильных ударов. А это едва ли можно рассматривать как идеальные условия для спокойного изучения природы, и не было бы ничего удивительного, если бы оказалось, что наши органы чувств дают нам искаженную картину внешнего мира. Действительно, органы чувств суть своего рода научные инструменты, при помощи которых мы наблюдаем мир, а мы вряд ли позволили бы бить молотком по гальванометру, служащему для производства измерений. Поэтому с точки зрения научных наблюдений было бы весьма желательно избавить свое тело от толчков, а это можно сделать, только лишив себя всякой опоры.

Итак, для того чтобы наблюдать природу без всяких внешних воздействий, мы должны прыгнуть в про-

пасть. Если вам это покажется несколько странным способом доказательства того, что тела не падают¹, то вернемся снова в наш оборвавшийся лифт. Там не нужно никаких подпорок, — наши собственные тела, наши гальванометры и вообще все измерительные приборы освобождены от ударов извне. С точки зрения падающего наблюдателя естественной является пространственно-временная система отсчета оторвавшегося лифта. Законы природы, определяемые в этих благоприятных условиях, во всяком случае не менее правильны, чем законы природы по отношению к другим системам отсчета.

Проделаем теперь другой опыт. Возьмем два яблока и поместим их в разные концы лифта. Что при этом произойдет? Сначала ничего особенного, — яблоки останутся висеть там, где мы их поместили. Выйдем теперь на минуту из лифта, чтобы проследить за дальнейшим ходом опыта. Благодаря тяготению оба яблока стремятся к центру Земли. По мере их приближения к нему их траектории приближаются друг к другу и наконец пересекаются в самом центре. Вернемся теперь снова в лифт. В первом приближении яблоки остаются висеть над полом лифта, но мало-помалу они сближаются друг с другом и в конце концов встречаются в тот момент, когда (согласно наблюдениям, производимым извне) лифт проходит через центр Земли. Таким образом хотя яблоки (в лифте) и не падают на пол, в их поведении все же есть что-то загадочное, и Ньютон в лифте мог бы сказать, что та причина, благодаря которой движутся звезды, обуславливает и странное поведение яблок в обыденной жизни.

¹ Мне кажется (правда, не на основании собственного опыта), что человек, прыгнувший в пропасть, скоро утратил бы всякое представление о падении. Он замечал бы только, что окружающие тела проносятся мимо него со все возрастающей скоростью.

В этом-то и состоит суть дела. В явлениях тяготения имеются и абсолютные и относительные черты. Мы воспринимаем главным образом последние, отнесенные к такой системе отсчета, которая не имеет особых преимуществ, кроме того, что мы ею пользуемся в обыденной жизни. Для человека в лифте эти черты совершенно исчезают. Если мы хотим дать абсолютное описание тяготения, надо в первую голову освободиться от относительных и основываться на остающихся абсолютных сторонах явления. Как будет показано ниже, абсолютное описание тяготения может быть сведено к существованию пространственно-временной кривизны.

НОВАЯ КАРТИНА ТЯГОТЕНИЯ

Согласно ньютоновой картине тяготение представляет собою силу, которая просто тащит и подвергаете ее действию тело, вызывая тем самым изменение его пути. Мы сейчас покажем, что это представление является неудовлетворительным. Вернемся снова к знаменитому случаю с ньютоновым яблоком. Классическое понятие тяготения базируется на ньютоновом истолковании этого случая, но пришла пора выслушать и яблоко. С обычным эгоизмом наблюдателя яблоко считает себя находящимся в покое и видит, как все земные предметы, в том числе и Ньютон, приближаются к нему со все возрастающей скоростью. Должно ли оно для объяснения этого явления постулировать существование какого-то таинственного агента? Нет, с его точки зрения причина ускоренного движения земных предметов совершенно очевидна. Ньютон находится под действием непрерывных ударов молекул земной коры, на которой он стоит. Эти удары являются абсолютными и совершенно не зависят от выбора системы отсчета. Обладая достаточно мощным микроскопом, каждый мог бы увидеть мо-

лекулы и сосчитать их удары. Согласно закону движения самого Ньютона под влиянием этих ударов он должен получить определенное ускорение, существование которого обнаруживает яблоко. Ньютону пришлось постулировать существование какой-то таинственной силы,двигающей яблоко вниз; яблоко же может указать на совершенно очевидную причину,двигающую Ньютона вверх.

Превосходство точки зрения яблока настолько подавляюще, что нужно несколько изменить постановку задачи для того, чтобы дать известные шансы и Ньютону. В самом деле, мне кажется, что яблоко преувеличивает свое чисто случайное преимущество. Допустим, что Ньютон находится в центре Земли, где сила веса равна нулю, т. е. где он может оставаться в покое и без удара молекул. Смотри вверх, он видит яблоки, падающие на поверхность Земли, и, как и раньше, объясняет их поведение существованием таинственной силы тяготения. Со своей стороны яблоко смотрит вниз и видит, что Ньютон приближается к нему.

Но на этот раз оно уже не может объяснить его движение толчками молекул,—ему тоже приходится ввести какую-то гипотетическую силу, действующую на Ньютона.

Мы имеем две системы отсчета. В одной из них Ньютон находится в покое, а яблоко обладает ускорением, а в другой—яблоко находится в покое, а Ньютон обладает ускорением. В обоих случаях ускорение не вызывается никакой видимой причиной, вроде молекулярных толчков. Между обеими системами отсчета существует полная взаимность: нет никаких оснований предпочесть одну из них другой. Причиной ускорения поэтому должен быть такой агент, который не связан с системой отсчета. Обыкновенная толчкообразная сила не годится в качестве такого агента, так как если мы приложим ее к яблоку,

то тем самым отдадим предпочтение ньютоновой системе отсчета и наоборот¹.

Причиной тяготения не может быть сила, так как мы не знаем, к какому телу ее приложить. Эту причину нужно описать иначе.

Древние считали Землю плоской. Ту небольшую часть земной поверхности, которая была им известна, можно было без особых неточностей изобразить на плоской карте. По мере открытия новых стран их естественно было попытаться нанести также на плоскую карту. Известным примером такой карты является меркаторская проекция. Вы помните, что на ней размеры Гренландии кажутся непомерно увеличенными (в других проекциях получается искажение всех направлений). С точки зрения сторонников плоской Земли карта показывает те расстояния, которые существуют в действительности; в частности, она показывает правильные размеры Гренландии. Как же они объяснили бы, что все расстояния в этой стране кажутся путешественникам гораздо короче своих „истинных“ значений? По-моему, им пришлось бы принять, что в Гренландии существует какой-то демон, помогающий путешественникам ходить. Ко-

¹ Могут возразить, что ньютонова система отсчета заслуживает предпочтения, поскольку рассматриваемое явление безусловно связано с существованием массивного тела (Земли) и поскольку с точки зрения Ньютона сила тяготения расположена симметрично относительно Земли, а с точки зрения яблока — несимметрично (т. е. равна нулю у яблока и имеет наибольшее значение у его антипода). Для того чтобы объяснить, почему этой симметрии нельзя придавать существенного значения, нужно более глубоко ознакомиться с теорией вопроса. Во всяком случае, оказывается, что критерий симметрии недостаточен для выбора единственно правильной системы отсчета. Признавая наличие известной симметрии у одних систем отсчета и отсутствие ее у других, вовсе не обязательно считать первые „правильными“, а вторые „неправильными“.

нечно, ни один ученый не употребил бы такого грубого слова,—он придумал бы какого-нибудь агента с греко-латинским названием, укорачивающего продолжительность путешествий,—но от этого дело не стало бы лучше. Предположим теперь, что обитатели Гренландии сами занимаются географией. Они обнаружили, что наиболее важная часть земной поверхности, т. е. сама Гренландия, может быть с большой точностью изображена на плоской карте. По размеры более отдаленных стран, например Греции, получают на такой карте увеличенными. Наши гренландские географы объяснили бы это тем, что в Греции существует какой-то демон, благодаря которому продолжительность всех путешествий не соответствует ясным указаниям плоской карты. Каждому кажется, что демон находится не у него, а у его соседа. Ясно, что истинное объяснение здесь кроется в кривизне Земли, и кажущаяся деятельность демона вызывается искусственным перенесением кривой поверхности на плоскую карту, осложняющим истинное положение вещей.

То, что случилось в теории Земли, случилось и в теории пространственно-временного мира. Наблюдатель, покоящийся относительно центра Земли, располагает все события в пространственно-временной системе отсчета, построенной согласно обычным условиям принципам. Все происходящие в его непосредственном соседстве события могут быть расположены в этой плоской системе отсчета без искажения своей естественной простоты. Предметы, находящиеся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, будут продолжать оставаться таковыми, пока не появится какой-нибудь непосредственно возмущающий агент вроде молекулярных толчков; свет будет распространяться по прямым линиям. Допустим теперь, что наш наблюдатель распространил свою систему отсчета до поверхности

Земли, где он встретился с явлением падения яблок. Это явление он приписывает действию какого-то таинственного демона, именующегося тяготением, который заставляет яблоки уклоняться от своего обычного равномерного движения. Но мы можем исходить и из системы отсчета самого яблока, т. е. человека в лифте. В этой системе тела, находящиеся в покое, остаются в покое; тела, движущиеся равномерно-прямолинейно, продолжают двигаться равномерно-прямолинейно. Но, как мы видели, в обоих концах лифта эти простые законы уже несправедливы; и если учесть явления, происходящие в центре Земли, то и здесь придется признать существование демона, толкающего ничем не поддерживаемые тела вверх (с точки зрения системы отсчета, связанной с лифтом). При переходе от одного наблюдателя к другому, т. е. от одной плоско-пространственной системы отсчета к другой, область деятельности демона меняется. Он никогда не находится там же, где сам наблюдатель, а всегда где-то в другом месте. Не ясно ли теперь, в чем суть дела? Демон появляется просто потому, что мы пытаемся втиснуть обладающий кривизной мир в плоскую систему отсчета. При этом нам приходится искажать его естественную простоту. Примите существование мировой кривизны, и таинственный агент исчезнет. Эйнштейн избавил нас от демона.

Не надо думать, что этот переход на другую точку зрения сразу приводит нас к объяснению тяготения. В данный момент нас интересует не объяснение, а просто описание. Введенное нами понятие мировой кривизны (каким бы трудным оно ни казалось) по сути дела гораздо яснее, чем понятие о какой-то толчкообразной силе, переходящей от одного предмета к другому, подобно тому, как мы выбираем систему отсчета.

НОВЫЙ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

Поскольку мы дали новую картину тяготения, нам нужно установить и новый закон тяготения. В самом деле, в законе Ньютона идет речь о величине толчкообразной силы; мы же совершенно отказываемся от рассмотрения этой силы. Явление тяготения мы свели к существованию пространственно-временной кривизны; следовательно, в новом законе должно содержаться какое-то утверждение, касающееся этой кривизны.

Число ограничений общего порядка, которое можно наложить на кривизну, очень невелико. Поэтому, когда Эйнштейну нужно было выбирать одно из этих ограничений, он почти автоматически выбрал правильное. Только выбранный им закон представляется рациональным, и справедливость его подтверждается наблюдениями.

Некоторым кажется невозможным наглядно представить себе кривизну пространства, не говоря уже о времени. Другие, наоборот, думают, что перенесение представления о кривизне с двухмерного на трех- или даже четырехмерное пространство не представляет непреодолимых затруднений. Я готов, пожалуй, присоединиться к первым, поскольку они, по крайней мере, не могут впасть в ошибку, стремясь к наглядности.

Когда у нас шла речь об „описании“, мы имели в виду не наглядное, а скорее аналитическое описание. Наши обычные представления о кривизне получаются на основе изучения поверхностей, т. е. двухмерных континуумов в трехмерном пространстве. Кривизна в каждой точке поверхности определяется одной величиной—так называемым радиусом кривизны. Пространственно же временный мир есть четырехмерный континуум, обладающий такими разнообразными возможными значениями кривизны, кручения и т. д.,

что для исчерпания всех этих возможностей его нужно поместить в пространство десяти измерений. Для определения кривизны в каждой его точке требуется целых двадцать коэффициентов, так называемых коэффициентов кривизны. При этом 10 из них играют большую роль, чем остальные 10.

Закон тяготения Эйнштейна утверждает, что десять главных коэффициентов кривизны в пустом пространстве равны нулю.

Если бы все коэффициенты были равны нулю, т. е. если бы кривизны совсем не было, то не было бы и тяготения. Тела двигались бы равномерно прямолинейно. Если бы все коэффициенты имели неопределенное значение, т. е. если бы на кривизну не налагалось никакого ограничения, то тяготение действовало бы произвольно, не подчиняясь никаким определенным законам. Тела двигались бы как угодно. Эйнштейн выбрал средний путь и положил, что 10 коэффициентов равны нулю, а остальные произвольны. Это значит, что в мире существует тяготение, действующее по определенным законам. Коэффициенты кривизны естественно разбиваются на 2 группы, по 10 в каждой, причем не представляет никаких затруднений указать, какие именно из них должны обращаться в нуль.

Посвященному может показаться странным, почему точный закон природы оставляет 10 коэффициентов произвольными. Но нужно иметь в виду, что известную роль должны играть и условия каждой частной задачи, к которой применяется данный закон. Общий закон тяготения покрывает бесчисленное множество отдельных частных случаев. Независимо от того, имеется ли одно или несколько притягивающих тел, 10 главных коэффициентов кривизны в пустом пространстве всегда равны нулю. Значение остальных 10 коэффициентов зависит уже от конкретных условий

задачи. Поэтому не надо забывать, что от математической формулировки закона тяготения Эйнштейна до применения его даже к одной из простейших конкретных проблем еще очень далеко. К счастью, промежуточные вычисления были проверены сотнями читателей, так что в правильности их можно быть уверенным. Эта вспомогательная работа дает возможность непосредственно проверить закон на наблюдениях. Оказывается, что закон Эйнштейна приводит практически к тем же следствиям, что и закон Ньютона, так что всякое подтверждение второго является в то же время и подтверждением первого. Однако существуют три астрономических проблемы, в которых проявляется различие между обоими законами, могущее быть проверенным наблюдениями. Во всех этих трех проблемах наблюдения подтверждают закон Эйнштейна¹.

Поскольку справедливость всякой теории основывается на ее согласии с опытом, тот факт, что закон Эйнштейна оказался в состоянии объяснить результаты, непонятные с точки зрения закона Ньютона, имеет громадное значение. Но основная причина, из-за которой мы вынуждены отказаться от закона Ньютона, заключается не в его неточности (проявляющейся в вышеупомянутых трех проблемах), а в его неспособности удовлетворить тем требованиям, которые мы сейчас предъявляем к законам физики. Эти требования были совершенно неизвестны Ньютону. Их можно коротко выразить следующим образом: астрономические наблюдения показывают, что в известных пределах точности и эйнштейновский и ньютоновский законы справедливы. Подтверждая (приблизительно) справедливость ньютоновского за-

¹ Одно из этих явлений — смещение спектральных линий на Солнце и звездах в красную сторону спектра (по сравнению с теми же линиями на Земле) — подтверждает скорее не закон Эйнштейна, а его теорию.

кона, мы делаем определенное утверждение по поводу хода событий, отнесенных к данной специально выбранной системе отсчета. Нет никаких оснований приписывать этой системе отсчета какое-то особо исключительное значение. Подтверждая же (приблизительно) закон Эйнштейна, мы делаем определенное утверждение по поводу абсолютных свойств мира, вернее, для всех пространственно-временных систем отсчета. Тот, кто интересуется не только внешней стороной явлений, должен, разумеется, предпочесть закон Эйнштейна, который выражает истинный физический смысл наблюдений. Видя, что закон Эйнштейна точнее, чем закон Ньютона, мы еще больше укрепляемся в мнении, что поиски абсолютного являются лучшим путем для понимания относительного. Но если бы эти поиски и не привели к немедленному успеху, мы вряд ли повернули бы обратно.

Я думаю, что Ньютон сам приветствовал бы то новое отступление „океана неоткрытых истин“, которое произошло через 200 лет после его смерти. Едва ли он считал бы нужным слепо цепляться за свои формулы, не считаясь со вновь открытыми фактами, и применять их в тех случаях, которые доселе были неизвестны.

Я не буду описывать здесь трех вышеуказанных подтверждений закона Эйнштейна, так как они хорошо известны и изложены в любом учебнике по теории относительности. Упомяну только об одном из них: о влиянии тяготения на распространение света. Световые волны, проходя мимо массивного тела (например Солнца), отклоняются на небольшой угол. Это является лишним доказательством непригодности ньютоновской картины тяготения. Действительно, сила, имеющая характер толчка, не может изменить путь волн. Для этого требуется агент какого-то другого типа.

ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

Попытайтесь теперь мысленно вернуться к своим первым урокам механики, когда ваш учитель старательно искоренял инстинктивно возникающие у вас правильные мысли. Вас обучали первому закону движения: „Каждое тело остается в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока какая-нибудь сила не выведет его из этого состояния“. У вас, наверно, возникали сомнения по этому поводу. Ведь всякое движение мало-помалу прекращается: если перестать прилагать силу к велосипеду, то он остановится. Учитель правильно разъяснял, что остановка велосипеда вызывается силами трения, и приводил в пример камень, скользящий по льду, движение которого вследствие малого трения льда длится гораздо дольше. Но даже и лед обладает трением. Почему же учитель не довел своей мысли до конца и совершенно не освободился от сил трения, что можно было бы легко сделать, попросту бросив камень в пустоте? Потому что, к несчастью, равномерного прямолинейного движения не получается, — камень описывает параболу. Если бы вы указали на это обстоятельство, то вам ответили бы, что камень был выведен из состояния равномерного прямолинейного движения невидимой силой тяготения. Откуда же мы знаем, что эта сила существует? Как же! Если бы ее не было, камень двигался бы по прямой линии.

Учитель твердо стоит на своем. Он ни за что не хочет отказываться от своего правила равномерного прямолинейного движения. Когда же ему указывают на тела, не подчиняющиеся этому правилу, он попросту выдумывает новую силу и приписывает получающиеся отклонения ее действию. По сути дела первый закон движения он должен был бы сформулировать так: „Каждое тело остается в состоянии покоя

или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока оно не выйдет из него“.

Движение тела может изменяться под действием очевидных и абсолютных причин, например под влиянием трения или сопротивления других материальных тел. Против этих причин я ничего не могу возразить. При наличии достаточно точных методов исследования в существовании молекулярных толчков может убедиться каждый наблюдатель независимо от выбора системы отсчета. Когда же конкретная причина возмущения не указывается, вся процедура делается произвольной. Совершенно без всяких оснований движение делится на две части, одна из которых приписывается пассивным стремлениям самого тела, т. е. его инерции, а другая—внешнему силовому полю. Утверждая, что тело само по себе стремится двигаться по прямой и сходит с нее под действием какого-то таинственного агента, мы приносим науку в жертву пагальности картины. Это утверждение, вместо одного свойства, приписывает телу два свойства, причем остается непонятным, почему они всегда пропорциональны друг другу, т. е. почему сила притяжения, действующая на данное тело, пропорциональна его массе (инертности). Такое искусственное рассечение становится невозможным, как только мы становимся на точку зрения равноправия всех систем отсчета. Снаряд, описывающий параболу по отношению к наблюдателю на поверхности Земли, описывает прямую по отношению к наблюдателю в лифте. Вряд ли нашему учителю удалось бы доказать человеку в лифте, что яблоко остается неподвижно висеть на месте только благодаря какой-то невидимой силе, тогда как в действительности оно само по себе стремится двигаться вверх¹.

¹ Легко убедиться, что если бы нашего учителя послали в лифт в качестве миссионера, он проповедовал бы именно такую доктрину.

Закон движения Эйнштейна не признает этого рассечения. На каждой поверхности существуют определенные кривые, вид которых не зависит от выбора системы координат. Это суть так называемые геодезические линии, или линии кратчайшего расстояния. Невозмущенное движение частиц в нашем пространственно-временном мире происходит как раз по этим линиям.

Рассмотрим планету, движущуюся вокруг Солнца по эллиптической орбите. Можно легко показать, что если ввести четвертое измерение (время), то этот эллипс даст нам в четырехмерном мире спиралевидную линию. Почему планета избирает не прямой, а спиралевидный путь? Потому что в области близ Солнца, геометрия которой характеризуется определенным видом кривизны, спираль представляет собой кратчайшее расстояние между двумя точками. Таким образом наша точка зрения существенно изменилась. Ньютоновская схема говорит, что планета стремится двигаться по прямой, но отклоняется в сторону благодаря силе притяжения Солнца. Эйнштейн же говорит, что планета стремится избрать кратчайший путь и избирает его.

Такова общая идея нового метода. Для уточнения пужно внести еще одну, несколько тривиальную поправку: планета избирает не самый короткий, а самый длинный путь.

Вы, наверно, помните, что точки, лежащие на четырехмерной траектории какого-нибудь материального тела (скорость которого не может превышать скорости света), являются абсолютным прошедшим или будущим, но не „абсолютно удаленным“ друг по отношению к другу. Иными словами, длина четырехмерной траектории составляет из временно-подобных интервалов и измеряется в единицах времени. Результат этого измерения дается числом секунд на

часах, сопровождающих тело в движении¹. Как мы уже говорили выше, показания этих часов могут быть отличны от показаний часов, пришедших от начальной до конечной точки к той же траектории другим путем. На стр. 48 мы имели дело с двумя субъектами, начальные и конечные точки траекторий которых совпадали, но в то время как один оставался дома на Земле, другой с необыкновенной быстротой достиг отдаленных областей вселенной и вернулся оттуда. При этом получилось, что первый прожил 70 лет, а второй всего 1 год. Продолжительность жизни оказалась наибольшей у того, кто оставался на невозмущенной траектории Земли. Тот же, кто подвергся действию сильной возмущающей силы (в момент своего наибольшего удаления), прожил всего 1 год. Это сокращение прожитого времени может идти беспрестанно: по мере того как скорость путешественника приближается к скорости света, прожитое им время стремится к нулю. Таким образом наикратчайшей четырехмерной траектории не существует, наидлинейшая же существует (и притом вполне однозначно). Если бы Земля сошла со своей действительной орбиты и начала двигаться со скоростью света, то промежуток времени от 1 января 1927 г. до 1 января 1928 г. был бы согласно показаниям земных наблюдателей и часов равен нулю, хотя согласно „времени Королевской обсерватории“ его пришлось бы считать за целый год. Но Земля этого не делает, следуя постановлению Всемирного профсоюза

¹ На это можно возразить, что нельзя заставить часы двигаться по любым образом искривленному пути без содействия внешних сил (например молекулярных толчков). Но это затруднение совершенно аналогично затруднению, возникающему при измерении длины кривой прямым масштабом, и устраняется таким же образом. К временным, как и к пространственным траекториям, применима обычная теория „стремления кривых“.

материи, гласящему, что „на каждую работу следует затрачивать возможно больше времени“.

Таким образом при вычислении траекторий планет и в других аналогичных проблемах приходится пользоваться двумя законами. Сначала нужно, пользуясь законом тяготения Эйнштейна (т. е. тем, что 10 главных коэффициентов кривизны равны нулю), определить пространственно-временную кривизну. Затем уж, пользуясь законом движения Эйнштейна (т. е. законом максимальной траектории), можно вычислить, каким образом движется в данной области планета.

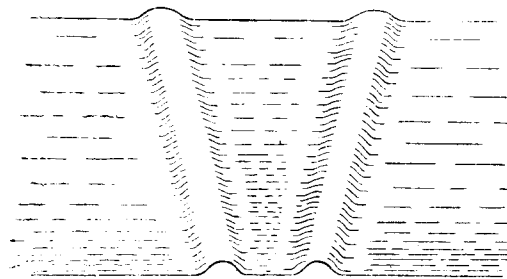


Рис. 5.

Эта процедура на первый взгляд аналогична обычному ходу вычислений с ньютоновскими законами движения и тяготения. Но здесь имеется одно существенное различие. Эйнштейновский закон движения можно вывести из закона тяготения. Хотя определение траектории планеты для удобства всегда разбивается на две последовательные стадии, оно по сути дела основывается на одном законе.

Я попытаюсь сейчас показать, каким образом можно на основании одного только закона, определяющего кривизну пустого пространства, найти траектории материальных частиц. На рис. 5 показаны две „частицы“

в четырехмерном мире, а именно *Вы* и *Я*. Поскольку мы не являемся пустым пространством, кривизна внутри нас может иметь любые значения,—именно это и отличает нас от пустоты. Мы представляем собою как бы складки четырехмерного мира, около которых он собирается в морщины. Математик на своем мало льстивом языке назвал бы нас „особыми линиями“. Между этими двумя заполненными материей складками лежит пустое пространство, в котором отсутствует тип кривизны, описываемый десятию главными коэффициентами. Из самого обыкновенного опыта известно, что если в платье появляются складки, то остающийся материал не укладывается так гладко, как раньше. Аналогично может оказаться невозможным соединить обе показанные на рис. 5 складки такой поверхности, которая обладала бы только дозволенными значениями кривизны. Именно так и обстоит дело в действительности. В пространственно-временном мире не могут существовать две изолированные прямые складки, поскольку кривизну соединяющей их пустой области нельзя подобрать дозволенным образом. Если же эти складки слегка наклоняются друг к другу, то промежуточная область уляжется ровно, сообразно закону кривизны. При большей величине наклона снова появляются педозволенные неровности. Закон тяготения играет здесь роль строгого портного, который почти во всем платье не допускает никаких сгибов (кроме тех, которые соответствуют определенным ограничительным условиям) и, именно исходя из этой цели, проводит все швы. Мы с вами должны подчиниться этому, и потому наши траектории слегка искривляются по направлению друг к другу. Наблюдатель со стороны привел бы это обстоятельство в качестве иллюстрации закона о взаимном притяжении двух массивных тел.

Таким образом мы можем теперь с другой точки

зрения подойти к факту образования спиралевидной четырехмерной траектории Земли. Справедливость ее вызывается необходимостью передвинуть обе складки (т. е. траектории Земли и Солнца) так, чтобы в находящейся между ними пустоте имелись только дозволенный вид кривизны. Складка Солнца более резко выражена и потому остается почти прямой; складка же Земли изгибается значительно больше.

Предположим теперь, что Земля, вопреки портному, начинает двигаться по прямой линии. По всему платью появляются тогда ужасные морщины, а так как существование их несовместимо с законами пустого пространства, то там, где они возникают, должно что-то находиться. Это „что-то“ может и не быть материей в тесном смысле слова. Те вещи, которые должны заполнять пространство, для того чтобы оно не было пустым (если подразумевать под пустотой то, о чем идет речь в законе Эйнштейна), суть масса или эквивалентная ей энергия, импульс и натяжение. В данном случае морщины соответствуют натяжениям. В самом деле, будучи предоставлена самой себе, Земля остается на своей искривленной орбите; если же между Землей и Солнцем появляются известного типа натяжения или давления, то эта орбита может принять другой вид. Если бы мы вдруг увидели, что планеты начинают двигаться по прямым линиям, то и ньютоналианцы и эйнштейнлианцы объяснили бы это поведение существованием какого-то натяжения.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ УСКОРЕНИЯ

Все рассуждения настоящей главы основываются на относительности ускорения. По отношению к наблюдателю, паходящемуся в обычных условиях, яблоко обладает ускорением в 980 см/сек^2 , по отношению же к человеку в лифте его ускорение равно нулю.

В зависимости от выбранной нами системы отсчета мы приписываем яблоку то или иное ускорение, но не выделяем ни одного из них в качестве „истинного“, или абсолютного ускорения. Именно поэтому мы и были вынуждены отказаться от ньютоновской концепции, которая выделяла ускорение в 980 см/сек^2 как единственно правильное и постулировала существование возмущающего агента соответствующей силы.

Рассмотрим обычно приводимое против такой точки зрения возражение, выдвинутое, насколько мне помнится, впервые Ленардом. Поезд проходит мимо станции со скоростью 90 км/час . Вследствие относительности скорости безразлично, как сказать: движется ли поезд мимо станции со скоростью 90 км/час или станция движется мимо поезда с той же скоростью. Предположим теперь, что вследствие какого-нибудь несчастного случая это движение в течение нескольких минут прекращается, т. е. что происходит изменение скорости—ускорение (понятие ускорения охватывает и замедление). Поскольку ускорение тоже относительно, его можно рассматривать как ускорение поезда (по отношению к станции) или, наоборот, как ускорение станции (по отношению к поезду). Почему же все-таки крушение причиняет увечья людям в поезде, а не людям на станции?

Аналогичное возражение было выдвинуто одним из моих слушателей: „Путешествие от Кембриджа до Эдинбурга показалось бы вам, наверно, весьма утомительным. Я понимаю причину вашей усталости, если вы идете к Эдинбургу, но отчего же вам уставать, если Эдинбург идет к вам?“ Ответить на это можно так: я устаю оттого, что сажусь на козлы, и тряусь на них в течение девяти часов; при этом совершенно безразлично, двигаюсь ли я к Эдинбургу или Эдинбург движется ко мне. Движение вообще никого не утомляет. Вместе с Землей мы проделыв-

ваем 30 км/сек вокруг Солнца, вместе с Солнцем— 18 км/сек по Млечному Пути, вместе с Млечным Путем— 375 км/сек по отношению к спиральным туманностям и т. д. Если бы движение утомляло, мы бы умерли от усталости.

Точно так же изменение движения, т. е. ускорение, само по себе не может никому причинить увечья, даже если рассматривать его (по Ньютону) как нечто абсолютное. Мы совершенно не ощущаем ускоренного движения Земли вокруг Солнца. Правда, мы ощущаем, например, движение железнодорожного вагона по кривой, но здесь непосредственно воспринимаемым является не само ускорение или нечто постоянно его сопровождающее, а случайная сторона явления (не имеющая места при ускорении движения Земли). Легко указать истинную причину увечий при железнодорожном крушении. Что-то остановило поезд,—поезд подвергся бомбардировке молекул, помешавшей ему идти дальше. Причина здесь очевидна, материальна и абсолютна. Ее может указать всякий, независимо от выбора системы отсчета. Кроме панесения увечий пассажирам, эта причина вызвала и замедление движения поезда по отношению к станции, которое совершенно так же могло быть вызвано молекулярной бомбардировкой станции, в данном случае не имевшей места.

Но наш критик, наверно, не удовлетворится этим объяснением. „Разве не парадоксальным является ваше утверждение о том, что молекулярная бомбардировка поезда вызывает ускорение движения станции, а вместе с ней Земли и всей остальной Вселенной? Относительное ускорение есть палка о двух концах, причем на первый взгляд мы можем произвольным образом ухватиться за любой из этих концов. Но в данном случае сама причина ускорения (молекулярная бомбардировка) ясно указывает, за какой конец нужно взяться, и говорит о том, что можно

взяться и за другой,—значит, просто играть с парадоксами“.

На это я отвечу, что если действительно бессмысленно говорить об ускорении станции, то подобную же бессмыслицу мы ежедневно совершаем в обыденной жизни. Ваше утверждение по сути дела гораздо более революционно, чем самые смелые утверждения Эйнштейна. Действительно, рассмотрим проблему падающего камня. Ускорение камня по отношению к нам или, что то же самое, наше ускорение по отношению к камню равно 980 см/сек^2 . За какой конец палки здесь нужно ухватиться? За тот, на который указывает молекулярная бомбардировка? Прекрасно. Камень не подвергается никакой бомбардировке; он свободно падает в пустоте. Мы же подвергаемся бомбардировке со стороны молекул земной коры, на которой мы стоим. Следовательно, в действительности ускорение принадлежит нам, ускорение же камня равно нулю, как это считает человек в лифте. По-вашему выходит, что единственно законной является система отсчета человека в лифте. Я не пошел так далеко, а только признал ее равноправие с нашей системой отсчета. Своим утверждением вы подтверждаете правоту пьяницы, говорящего, что „булыжник поднялся и ударил меня“, и отвергаете показания спорящего с ним полисмена, как „игру в парадоксы“. По-вашему получается, что булыжник все время мчался вверх с постоянно возрастающей скоростью, подталкивая перед собой человека, так что их относительное положение оставалось неизменным. Когда же ось тела пьяницы потеряла равновесие, он не смог продолжать движение с достаточной быстротой, так что булыжник обогнал его и пришел в соприкосновение с его головой. Вот к чему, если угодно, приводит ваше утверждение, или, вернее, то утверждение, которое я взял на себя свободу навязать вам, так как оно, есте-

ственно, приходит в голову в полемике против теории относительности. Эйнштейн же утверждает, что хотя вышеизложенная точка зрения на происходящее событие вполне законна, обычная точка зрения полисмена тоже законна. Он играет при этом роль мудрого судьи, примиряющего обе спорящие стороны.

ГЕОМЕТРИЯ ВРЕМЕНИ

В законе тяготения Эйнштейна в противоположность закону тяготения Ньютона, трактующему о механической величине — силе, идет речь о некоторой геометрической величине — кривизне. Для того чтобы понять происхождение этой геометрии мира, производимой теорией относительности, мы должны несколько вернуться вспять.

Геометрией называется наука, изучающая свойства пространства. До сих пор она совершенно не интересовалась вопросом о свойствах времени. Но благодаря теории относительности пространство и время так тесно переплелись друг с другом, что должна была возникнуть какая-то единая обобщенная геометрия, охватывающая их обоих. Трехмерное пространство представляет собою только сечение четырехмерного пространственно-временного мира, причем сечения, проведенные по различным направлениям, соответствуют системам пространственного отсчета различных наблюдателей. Вряд ли целесообразно стоять на той точке зрения, что предметом геометрии должно служить только изучение сечения, проведенного по какому-то определенному направлению, изучение же сечений, проведенных по другим направлениям, принадлежит совершенно другой науке. Поэтому мировая геометрия должна наряду с пространством охватить и время. Остановимся на некоторых вопросах геометрии времени.

Мы уже говорили, что, несмотря на тесную связь

пространства с временем, между временно-подобными и пространственно-подобными интервалами существует абсолютное различие. Если какие-нибудь три события абсолютно удалены друг от друга, то они образуют пространственный треугольник, стороны которого соответствуют пространственно-подобным интервалам¹. Если же эти три события находятся в абсолютно прошедшем или будущем по отношению друг к другу, то они образуют временной треугольник, стороны которого соответствуют временно-подобным интервалам (могут существовать и смешанные треугольники, две стороны которых временно-подобны, а одна пространственно-подобна, или наоборот). Хорошо известно, что в пространственном треугольнике сумма любых двух сторон больше третьей стороны. Во временном же треугольнике имеет место совершенно другой закон: сумма двух (правда, не любых) его сторон меньше третьей стороны. Такой треугольник трудно себе представить, но именно так обстоит дело в действительности.

Уясним себе точнее смысл этих геометрических предложений. Возьмем сначала пространственный треугольник. Речь идет о длине его сторон, так что здесь полезно вспомнить дискуссию, возникшую между нашими двумя студентами по поводу измерения длины (стр. 32). К счастью, в данном случае недоразумения возникнуть не может, поскольку совокупность всех событий определяет плоское сечение мира, по отношению к которому наш треугольник является чисто пространственным. Вышеуказанное утверждение, касающееся длины его сторон, можно выразить так: „Сумма чисел делений масштаба, укладываемых соответственно на отрезке AB и BC , больше числа

делений масштаба, укладываемых на отрезке AC “. Во временном треугольнике измерения производятся при помощи часов, так что наше утверждение получает другой вид: „Сумма показаний часов при переходе от A к B и от B к C меньше, чем показание часов при переходе от A к C “.

Для того чтобы измерить при помощи часов интервал между событиями A и B , нужно произвести установку часов, аналогичную повороту масштаба вдоль прямой AB . В чем же заключается эта установка? И в том и в другом случае события A и B нужно привести в непосредственное соприкосновение с масштабом или с часами. Это значит, что непосредственно вслед за событием A часы должны начать двигаться с такой скоростью, чтобы во-время достичь того места, где происходит событие B . Таким образом часам нужно придать некоторую вполне определенную скорость. Заметим далее, что при измерении пространственного отрезка AB можно повернуть масштаб на 180° и получить тот же результат, измерив отрезок BA . Часы же нельзя повернуть на 180° , т. е. нельзя заставить их идти в обратном направлении.

Это обстоятельство играет существенную роль для определения того, какие из двух сторон меньше третьей стороны. Если выбрать не ту пару сторон, какую нужно, то само утверждение потеряет смысл, поскольку в нем будет содержаться ссылка на фактически неосуществимое измерение.

Вспомните о том путешественнике (стр. 49), который побывал на удаленной звезде и вернулся абсурдно молодым. По сути дела он представлял собою часы, измеряющие две стороны временного треугольника. Прожитый им промежуток времени оказался меньше, чем у покоящегося наблюдателя, т. е. у часов, измеряющих третью сторону того же треугольника. В самом деле, каждого из нас можно рас-

¹ Этот треугольник состоит из мгновенных событий. Если же брать события в их длительности, то он превратится в своего рода четырехмерную призму.

смагивать как часы, отсчитывающие проживаемые нами годы. Наш пример можно поэтому рассмагивать просто как иллюстрацию геометрических свойств временных треугольников (которые в свою очередь вытекают из эйнштейновского закона максимальной траектории). Его можно легко объяснить и с обычной механической точки зрения. Масса всех частиц движущегося человека растет с возрастанием его скорости сообразно вышеразобранному закону (подтвержденному на опыте). Вслед за нею увеличивается инерция частиц и замедляется (с точки зрения земной системы отсчета времени) ход всех жизненных процессов у нашего путешественника. Однако тот факт, что этому результату можно дать рациональное объяснение, отнюдь не умаляет его значения как некоторого определенного предложения геометрии времени.

Таким образом пространственно-временная геометрия отличается от обычной эвклидовой геометрии не только наличием четвертого измерения. Геометрические свойства времени не удовлетворяют пространственным аксиомам Эвклида, хотя и аналогичны им. Заметим, что это различие между геометриями пространства и времени не очень глубоко, и математически от него можно легко освободиться при помощи символа $\sqrt{-1}$. Поэтому и пространственно-временную геометрию можно в известном смысле называть эвклидовой (иногда, когда хотят подчеркнуть ее отличие от обычной геометрии, ее называют также гиперболической геометрией). Термин „неэвклидова геометрия“ обычно связывается с существованием пространственно-временной кривизны, т. е. поля тяготения. Если взять обычную эвклидову геометрию пространства и внести в нее сравнительно простые измерения, прибавив четвертое измерение—время, то явление тяготения этим еще не будет учтено. Везде, где имеется поле тяготения, эта расширенная эвкли-

дова геометрия является неточной, и истинной геометрией служит неэвклидова. Различие между этими двумя типами геометрий сводится к различию между плоской и искривленной областью.

ГЕОМЕТРИЯ И МЕХАНИКА

Как мы уже говорили выше, всякое предложение, касающееся временных треугольников, есть в то же время определенное утверждение по поводу поведения часов, движущихся с различными скоростями. Это обстоятельство заслуживает особого внимания. Обычно мы считали, что изучение поведения часов составляет задачу механики. Однако оказалось, что область геометрии нельзя ограничить одним только пространством и что ее приходится несколько расширить. Выйдя из поставленных ей раньше границ, геометрия мало-помалу поглотила всю механику и начала делать попытку овладеть электромагнетизмом. Идеал, к которому мы стремимся, заключается в объединении всех наших сведений о физическом мире в единую науку, положения которой могут быть выражены в терминах геометрических или квазигеометрических концепций. В самом деле, все эти сведения получены при помощи измерений, произведенных различными инструментами. Инструменты, которыми мы пользуемся в различных областях науки, ничем существенным не отличаются друг от друга. Поэтому нет никаких оснований рассмагивать установленное еще в древности деление наук как нечто неизменное.

Но механика, объединившись с геометрией, тем не менее осталась механикой. Различие между механикой и геометрией стерлось,—они попросту слились друг с другом. Кажущееся превосходство геометрии по сути дела объясняется тем, что она обладает более богатой и удобной терминологией, так что после слияния мы для избежания двойственности пользу-

емя только геометрическими терминами. Но геометризация механики есть в то же время механизация геометрии. Как мы уже говорили выше, предложение, касающееся длины сторон пространственных треугольников, сводится к грубо материальным утверждениям по поводу поведения масштабов и тем самым вовсе не является, как думают некоторые, делом чистой математики.

Мы должны раз навсегда освободиться от той мысли, что слово „пространство“ в науке означает *пустоту*. Пространство имеет смысл только как совокупность определенных расстояний, объемов, вообще величин, которые, подобно, например, силе, являются результатами физических измерений. Поэтому часто делаемое (несколько грубое) утверждение, что теория Эйнштейна сводит тяготение к свойствам пространства, не должно вызывать недоразумений. Физик не может рассматривать пространство как пустоту. Как бы его ни опустошать, в нем всегда остается эфир. Тем же, кому почему-либо не нравится слово эфир, приходится разбрасывать математические символы просто по вакууму, и, по-моему, они все-таки должны приписать эти символы какому-то носителю. Даже такую относительную и изменчивую вещь, как сила, нельзя построить „из ничего“.

Глава V. ТЕОРИЯ КВАНТОВ

С ЧЕГО ВСЕ НАЧАЛОСЬ

В настоящее время, где бы ни встретились двое почитателей теоретической физики, разговор их рано или поздно принимает определенное направление. Перед вашим уходом они могли беседовать об интересующих их специальных вопросах или о последних открытиях; но вернитесь через час, и можно ручаться, что вы их застанете за обсуждением одной всеохватывающей темы: нашего безграничного невежества. Такие разговоры—не простая рисовка и не научная скромность. Скорее это выражение наивного удивления перед хитростью Природы, скрывающей свою тайну от такого могучего интеллекта, как человеческий мозг. Двигаясь по пути научного развития, мы как будто повернули за угол, и перед нами сразу раскрылась зияющая бездна нашего невежества. В самых основах современной физики содержится какаля-то коренная ошибка, исправить которую мы не в состоянии.

Причиной всех этих неприятностей является маленькая величина h , с которой мы встречаемся в целом ряде опытов. В известном смысле мы знаем, что такое h , так как можем измерить ее самыми разнообразными способами: h —это

0,0000000000000000000000000000655 эрг/сек.

Отсюда сразу видно, что h очень мало; но суть дела здесь не в цифре, а в слове „эрг-секунда“. Эрг есть

единица энергии, секунда—единица времени; следовательно, h по своей природе есть энергия, помноженная на время.

В практической жизни нам почти никогда не приходится умножать энергию на время. Мы часто делим энергию на время; так, например, инженер делит энергию, отдаваемую его машиной, на время, для того чтобы определить число лошадиных сил. Обратное: электрическая компания умножает лошадиные силы или киловатты на число часов потребления и соответственно этому посылает счет. Но множить эту энергию снова на число часов представляется на первый взгляд весьма нецелесообразным.

Иначе обстоит дело в абсолютном четырехмерном мире. Такие величины, как энергия (в данный момент времени), принадлежат трехмерному пространству; для того же чтобы дать им место в четырехмерном мире, их нужно умножить на свою длительность во времени. В самом деле, рассмотрим определенную область пространства, например Великобританию. Та доля человечества, которая заключена в этой области, равна 40 млн. человек. Если же взять определенную область пространственно-временного мира, например Великобританию, в промежутке между 1815 и 1915 гг., то доля человечества, заключающегося в ней, будет измеряться в 4000 млн. человеко-лет. Место, занимаемое человечеством в пространственно-временном мире, должно быть выражено в единицах, ограниченных не только в пространстве, но и во времени. Точно так же, если той или иной области пространства приписывается определенное количество эргов, то соответствующая область пространственно-временного мира будет характеризоваться таким же количеством эрг-секунд.

Та величина, которая представляет собою аналог энергии в четырехмерном мире, носит название действия. Хотя этот термин вряд ли особенно пригоден

для данного случая, мы в дальнейшем будем им пользоваться. Поскольку действие (выражаемое в эрг-секундах) принадлежит миру Минковского, однако-му с точки зрения всех наблюдателей, оно является абсолютной величиной. Это одна из очень немногих абсолютных величин, известных дорелятивистской физике. За исключением действия и энтропии (которая принадлежит к совершенно другому классу физических понятий), все величины, с которыми имела дело дорелятивистская физика, относились к трехмерным сечениям мира, различным для различных наблюдателей.

Понятием действия пользовались в динамике еще задолго до того, как теория относительности дала возможность предвидеть, что это понятие благодаря своей абсолютности играет крупную роль в схеме Природы, и до того, как начала появляться в наших опытах величина h . Особенно многим мы здесь обязаны сэру Вильяму Гамильтону, работы которого послужили основой для целого ряда дальнейших исследований. Достаточно сослаться на учебник аналитической механики нашего собственного (эдинбургского) профессора¹, где все это прекрасно изложено. Огромное значение самого принципа Гамильтона было ясно для всех, но нужно сознаться, что для неспециалиста дальнейшие исследования по этому пути казались мало интересными, поскольку они сводились к сложным объяснениям простых вещей. Однако в конце концов инстинкт, толкавший на эти исследования, блестяще оправдал себя. Ни один из результатов, полученных квантовой теорией, начиная с 1917 г., нельзя понять, не зная гамильтоновских работ по динамике. Замечательно, что подобно тому как Эйнштейн нашел в виде тензорного анализа готовый математический аппарат для своей теории тяготения, квантовые физики нашли

¹ Проф. Э. Уайтхедера.

в готовом виде теорию динамического действия, без которой их успехи были бы невозможны.

По ли абсолютность действия в четырехмерном мире, ни та роль, которую оно играло в гамильтоновой динамике, не могут объяснить, почему „порция“ действия его определенной величины имеет особо выдающееся значение. В целом ряде опытов мы встречаемся с „порцией“ действия размерами в $6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Разумеется, проще всего было бы предположить, что действие имеет атомное строение, и рассматривать $6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек как атом действия. Но многочисленные попытки последнего десятилетия показали, что этого сделать нельзя. Существование атомов действия несовместимо с нашими современными представлениями о вселенной. Для объяснения его необходим радикальный пересмотр всех основных понятий, на которых до сих пор базировалась физика. Перед нами стоит задача этот пересмотр произвести. Начиная с 1925 г. по данному вопросу появился ряд новых исследований, отчасти разъясняющих, в каком направлении должна будет пойти революция наших понятий. Однако окончательного выхода из затруднений еще не дано. Эти новые идеи будут разобраны в следующей главе, пока же мы будем стоять на точке зрения, господствовавшей до 1925 г. Только в конце главы мы несколько отступим от нее, для того чтобы облегчить переход к новым идеям.

АТОМ ДЕЙСТВИЯ

Поскольку действие представляет собой произведение энергии на время, существование атомов действия, очевидно, имеет место только в таких процессах природы, в которых определенное количество энергии связано с определенным периодом времени. Так, например, электрон содержит определенное количество энергии, но он не обладает никакой определенной

временной деятельностью, и потому его энергия не может быть составной частью атома действия. Нас в данный момент интересуют только такие виды энергии, которые связаны с определенным промежутком времени. Такова, например, энергия световых лучей, неразрывно связанная с периодом колебания этих лучей. Желтая линия натрия представляет собой колебания эфира с частотой в 510 триллионов в секунду. На первый взгляд мы встречаемся здесь с затруднением обратного характера: определенный период времени налицо, но можно ли разбить естественным образом на доли ту энергию, которую излучает пламя натрия? Естественно попытаться выделить излучение каждого отдельного атома, но это не приведет еще к окончательному разбиению энергии, поскольку атом излучает не непрерывно, а толчками: послав ряд волн, он останавливается и возобновляет излучение лишь под влиянием какого-нибудь внешнего воздействия. На обыкновенном световом луче эта прерывистость незаметна, потому что он складывается из излучений целых мириадов атомов.

Количество энергии, теряемое атомом натрия при каждом акте излучения, равно $3,4 \cdot 10^{-12}$ эрг. Эта энергия, как мы уже говорили, связана с периодом времени в $1,9 \cdot 10^{-15}$ сек. Мы получаем таким образом две составные части для построения естественного атома действия. Произведение их равно $6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Это и есть величина h .

Замечательно, что, идя таким путем, мы всегда получаем один и тот же результат. Можно взять в качестве источника света другой атом, например атом водорода, кальция и т. д. Энергия его излучения будет выражаться другим числом эрг, а период—другим числом секунд, но произведение даст все время одно и то же число эрг-секунд. То же относится и к рентгеновским и к γ -лучам и к другим видам излучения и поглощения (поглощение, как и излуче-

ние, идет непрерывно). Очевидно, h есть своего рода атом, из множества которых состоит излучение, но не атом материи, а атом, или как говорят обычно, квант действия. Наряду с девяносто двумя материальными атомами существует всего один атом действия, одинаковый для всех видов материи. Слово „одинаковый“ я понимаю здесь буквально. На первый взгляд может показаться, что между квантами красного и синего цвета должно существовать какое-то качественное различие (хотя они содержат одинаковое количество эрг-секунд), но в действительности это различие имеется лишь по отношению к данной пространственно-временной системе отсчета и совершенно не касается абсолютных атомов действия. Двигаясь навстречу источнику света с большой скоростью, мы, согласно принципу Доплера, воспринимаем его красный цвет как синий; одновременно с этим при переходе к новой системе отсчета меняется и энергия волн. Излучаемые натрием и водородом атомы действия совершенно одинаковы, но имеют различные ориентации по отношению к тем сечениям, которые мы проводим через четырехмерный мир. Изменяя свою скорость, мы тем самым меняем направление линий *Теперь*, так что рано или поздно можем увидеть кванты натрия под той ориентацией, под которой раньше видели кванты водорода, и убедиться в их полной тождественности.

Состояние термодинамического равновесия (т. е. полное рассеяние энергии) возможно только при наличии неделимых единиц энергии. Если бы, тасуя карты, мы разрывали их на все более и более мелкие кусочки, то никогда не достигли бы совершенно беспорядочного распределения. Этими неделимыми единицами энергии и являются кванты. В каждом из актов излучения, поглощения и рассеяния, посредством которых энергия распределяется по материи и эфиру, может принимать участие только один

квант. Именно исследования термодинамического равновесия и навели проф. Макса Планка на след кванта (величина h была впервые вычислена на основе анализа равновесного излучения). Дальнейшее развитие основных принципов теории квантов дал Эйнштейн, применением же ее к вопросам структуры атома мы обязаны Нильсу Бору.

Загадочность природы кванта заключается в том, что, будучи неделимым, он тем не менее не имеет определенных границ в пространстве. Пока мы имеем дело со сгустком энергии, собранной в одном месте, т. е. с электроном, мы не встречаемся с h ; как только мы переходим к энергии, расплывающейся в пространстве, т. е. к световым волнам, h появляется. Атом действия не имеет границ,—он как бы заполняет собой все пространство. Какое место мы должны указать такому атому в нашей пространственно-временной схеме мироздания?

КОНФЛИКТ С ВОЛНОВОЙ ТЕОРИЕЙ СВЕТА

Понятие кванта приводит к целому ряду затруднений. Наиболее значительным из них является возрождение световых частиц в лице h -зерен, противоречащее всем классическим представлениям о свете. В самом деле, рассмотрим световые волны, являющиеся результатом единого акта излучения атома, например на Сириусе. Они характеризуются определенными значениями энергии и периода колебаний, произведение которых равно h . Период переносится волнами без изменения; энергия же распространяется на все большее и большее пространство. Через 8 лет и 9 месяцев после первоначального акта излучения волновой фронт достигает поверхности Земли. Допустим, что за несколько минут до этого кому-нибудь пришлось в голову полюбоваться красотою звездного неба, т. е. попросту поставить свой

глаз на пути нашего луча. Пачиная свой путь, световые волны, конечно, не знали, куда они попадут, а знали только, что им, подобно своим товарищам, придется проделать путешествие по всему бесконечному пространству. Их энергия, казалось, должна была распылиться по сфере радиуса в 50 триллионов миль. И все-таки, когда этой энергии приходится снова входить в материю, вызывая, например, химические изменения в сетчатке, которые соответствуют световому ощущению, она входит как едипичный квант действия. Или не входит ничего или входит ровно $6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Точно так же как излучающий атом, несмотря на все законы классической физики, испускает только h , поглощающий атом решает, что все приходящее к нему должно быть равно h . Не все волны проходят мимо нашего глаза, ведь мы все-таки видим Сириус. Как же они попадают к нам? Ударяющиеся о наш глаз капли зовут к себе остальные части волны, крича: „Мы нашли глаз! Помогите нам влезть туда!“

Попытки объяснить это явление идут по двум путям, которые можно назвать соответственно теорией „копилки“ и теорией „лотереи“. Говоря популярно, дело здесь сводится к следующему: согласно первой теории атом имеет у себя копилку, в которую каждая группа волн дает очень небольшой вклад. Когда сумма всех этих вкладов достигает размеров одного кванта, происходит акт поглощения. Согласно второй теории та небольшая доля кванта, которая попадает на атом, служит ему как бы для покупки билета лотереи, выигрыши которой суть целые кванты. Часть атомов выигрывает и таким образом получает возможность поглощать целые кванты. Эти атомы на сетчатке и дают знать о существовании Сириуса.

Объяснение с копилкой не выдерживает критики. Как выразился однажды Джинс, квантовая теория не

только запрещает убивать двух птиц одним камнем, но не дает убить и одной птицы двумя камнями. Я не буду ~~дейтельно~~ излагать доводы, говорящие против первой версии; укажу лишь на ряд связанных с ней затруднений. Первое из этих затруднений возникает при рассмотрении копилки, наполненной до половины. Пусть у нас имеются не атомы, а молекулы, которые тоже могут поглощать только целыми квантами. Может случиться, что определенная молекула, накапливая у себя различные виды энергии, которые она способна абсорбировать, не успевает накопить ни одного целого кванта до того, как начинает принимать участие в химической реакции. В результате этой реакции получаются новые молекулы, спектр поглощения которых совершенно иной. Им придется, очевидно, заново начать собирать энергию пужного им света. Что же делается со ставшими ненужными старыми запасами, которые уже никогда не могут быть пополнены? Не возвращаются же они обратно в эфир во время реакции?

Другое явление, явно противоречащее теории копилки, есть фотоэлектрический эффект. Когда на металлическую пластинку, сделанную, например, из натрия, калия, рубидия и т. д., падает свет, из нее начинают вылетать свободные электроны. Скорость, т. е. энергия этих быстро летающих электронов, может быть измерена. Оказывается, что величина энергии выбрасываемых из металла электронов, представляемая падающим светом, подчиняется весьма замечательному правилу. Во-первых, скорость электронов не возрастает с увеличением интенсивности света. Чем больше падает света, тем больше происходит „взрывов“, но энергия каждого взрыва в отдельности не меняется. Во-вторых, скорость электронов увеличивается при переходе к фиолетовому концу спектра, т. е. к более коротким волнам. Так, например, слабый свет, доходящий до нас от Сириуса, произ-

вел бы более мощные взрывы, чем свет Солнца, потому что частота его больше. Отдаленность Сириуса не влияет на скорость выбрасываемых электронов, она только делает их число чрезвычайно малым.

Это одно из наиболее характерных квантовых явлений. Каждый вылетающий из металла электрон забирает у падающего света энергию, в точности равную одному кванту. Поскольку h постоянно, более коротким колебаниям (т. е. более близким к фиолетовому концу спектра) соответствует большая энергия. Опыт показывает, что кинетическая энергия каждого электрона в точности равна одному кванту энергии падающего света (минус энергия, необходимая для вырывания электрона из металла).

Сама пластинка может быть приготовлена в темноте. Как только она подвергается действию хотя бы слабого света, электроны немедленно начинают вылетать, причем это происходит задолго до того, как может оказаться наполненной хотя бы одна из копилки. Говорить о том, что свет играет здесь лишь роль „курка“, освобождающего электрон, который уже и раньше обладал требуемой энергией, тоже нельзя, поскольку величина энергии определяется именно свойствами света. Свет затевает всю музыку, следовательно, он должен и заплатить музыкантам. По классической же теории он оказывается неплатежеспособным.

Очень трудно выдвинуть против какой-нибудь теории такие решающие возражения, чтобы опровергнуть ее окончательно. Но даже если и можно еще кое-как выкручиваться из положения, рано или поздно становится ясной вся искусственность этих выкрутас. Тот инстинкт, который позволяет нам определять роль каждого закона в Природе, говорит, что факт взаимодействия между материей и излучением делыми квантами лежит в самом фундаменте структуры мироздания, а не является случайной

деталью атомного механизма. Мы обращаемся поэтому к теории „лотереи“, в которой квантовые явления служат исходным пунктом для радикального пересмотра всех классических понятий.

Пусть интенсивность света такова, что согласно обычным представлениям о распределении его энергии на каждый атом должна попасть одна миллионная доля кванта. В действительности же получается, что не каждый атом поглощает одну миллионную кванта, а один атом на миллион поглощает целый квант. В самом деле, явление фотоэлектрического эффекта показывает, что на вылет каждого из электронов тратится энергия целого кванта.

Таким образом оказывается, что световые волны приносят каждому атому не одну миллионную долю кванта, а одну миллионную вероятности получить целый квант. Согласно волновой теории света по всей волновой поверхности равномерно распределено что-то, обычно отождествляемое с энергией. Явления интерференции и дифракции не дают возможности отказаться от этого равномерного распределения, но мы теперь интерпретируем его по-иному как распределение вероятности появления энергии. Возвращаясь к старому определению энергии как „способности производить работу“, можно сказать, что в каждой точке поверхности волны имеется определенная вероятность произвести работу. Именно с распространением этой вероятности и имела дело волновая теория.

По вопросу о том, каким образом распределяются „призы“, в теории лотереи существуют разногласия. Некоторые думают, что „выигрышные“ места волновой поверхности определены еще до того, как волна достигает атома. Получается, что наряду с распространением волны происходит также распространение „фотона“ или „выигрышного луча“. Такая точка зрения, по моему мнению, противоречит всему духу

современной квантовой теории. Хотя она поддерживается многими авторитетами и подтверждается, по видимому, некоторыми опытами, я все же не убежден в ее окончательном торжестве.

ТЕОРИЯ АТОМА

Вернемся теперь к экспериментальным подтверждениям теории квантов. Таинственная величина h встречается не только вне атома, но и внутри него. Рассмотрим простейший из всех атомов—атом водорода. Он состоит из одного протона и одного электрона. Протон заключает в себе почти всю массу атома и остается неподвижным в его центре, тогда как быстрый электрон, притягиваемый протоном согласно закону обратных квадратов, вращается вокруг него по круговой или по эллиптической орбите.

Вся эта система чрезвычайно напоминает планетную. Но в то время как в солнечной системе орбиты планет могут обладать любыми размерами и любым эксцентриситетом, форма и размеры орбиты электрона могут принимать только одно из определенного дискретного ряда значений. Это ограничение совершенно не вытекает из законов классической электродинамики, но тем не менее оно существует, и закон его известен. Появляется оно потому, что определенная величина, характеризующая атом, должна быть равна h . Промежуточные орбиты исключаются, так как они потребовали бы введения долей h , а h неделимо.

Заметим, что при поглощении и излучении энергии атомом величина ее и соответствующий период должны давать произведение, в точности равное h . В своих же внутренних долях атом не возражает и против $2h$, $3h$, $4h$ и т. д.: он только категорически устраняет доли h . Этим объясняется суще-

ствование целого ряда возможных орбит электрона, соответствующих целым кратным h . Множитель при h называется квантовым числом; соответственно, говорят о первой, второй и т. д. квантовых орбитах. Я не буду здесь касаться точного определения тех величин, которые должны быть кратными h ; укажу лишь, что все они с четырехмерной точки зрения представляют собой действие (хотя это обычно и не бросается в глаза при рассмотрении трехмерных сечений мира). Так как таких величин имеется в атоме несколько, то приходится вводить несколько независимых квантовых чисел. Для избежания осложнений я в дальнейшем буду говорить только о том квантовом числе, которое соответствует наиболее существенной черте в структуре атома.

Согласно такой картине атома, впервые данной Нильсом Бором, единственное возможное изменение его состояния состоит в переходе электрона с одной квантовой орбиты на другую. Такие скачки должны происходить при каждом акте поглощения или излучения света. Пусть какой-нибудь электрон, находящийся на одной из высоких орбит, перескакивает на орбиту с меньшей энергией. Атом получает при этом определенный излишек энергии, от которого он должен освободиться. Порция теряемой атомом энергии известна; остается определить период тех колебаний эфира, в которые эта энергия переходит. На первый взгляд, кажется, что атом может раскатать эфир только в том периоде, в котором он колеблется сам. Однако опыт показывает, что период колебаний электронов в самом атоме не имеет никакого отношения к периоду возбуждаемых атомом эфирных волн. Этот последний определяется не свойствами какого-то наглядного механизма, а на первый взгляд, искусственным правилом h . Получается, что атом как бы беззаботно выбрасывает за борт определенную порцию энергии, которая, попав

в эфир, превращается в квант действия, т. е. принимает период такой величины, чтобы произведение его на величину порции было равно h . Протекающий в обратном направлении процесс поглощения еще более противоречит нашим обычным понятиям, чем этот немеханический процесс излучения. В этом случае атому приходится отыскивать в точности такую порцию энергии, которая требуется для того, чтобы перенести электрон с низшей орбиты на высшую. Эту порцию ему могут доставить только волны определенного периода, определяемого правилом h и не имеющего никакого отношения к периоду собственных колебаний атома.

Это замечательное соответствие между энергией орбитального перескока и периодом света, уносящего эту энергию, произведение которых всегда равно h , является одним из наиболее ярких доказательств доминирующей роли кванта. Остановимся поэтому вкратце на возможных способах измерения энергии орбитального перескока. Известно, что изолированному электрону можно придать заданную энергию, помещая его в поле определенного направления. Когда такой „снаряд“ попадает на атом, то он может или заставить один из его свободных электронов перескочить на более высокую орбиту, если, конечно, его энергия достаточна для того, чтобы произвести такой перескок, или, если его энергия недостаточна для этого,—просто отлететь от атома без потери энергии. Представим себе, что пучок электронов, обладающих одинаковой известной нам энергией, попадает в большую группу атомов. Если энергия электронов ниже той, которая требуется для перескока, то пучок проходит через весь слой атомов, не вступая с ними ни в какое взаимодействие (кроме обычного рассеяния). Начнем теперь постепенно увеличивать энергию электронов; при этом внезапно окажется, что электроны при прохожде-

нии через атомы начинают терять значительную долю своей энергии. Это произойдет тогда, когда энергия достигнет своего критического значения и начнут появляться орбитальные перескоки. Таким образом мы получаем возможность измерять энергию перескока, т. е. разность значений энергии атома в начальном и конечном состояниях. Выгода этого метода измерения заключается в том, что применение его не требует знания постоянной h , и мы избегаем порочного круга при проверке правила h ¹. Отметим, что описанный опыт служит еще одним доводом против теории копилки. Небольшие вклады энергии неблагоприятно отвергаются: от электронов, неспособных заплатить за полный перескок, плата совсем не принимается.

СВЯЗЬ КВАНТОВЫХ ЗАКОНОВ С КЛАССИЧЕСКИМИ

Мы не будем здесь рассматривать применения теории квант в других областях современной физики: в учении об удельных теплотах, магнетизме, рентгеновых лучах, радиоактивности и т. д. Вернемся к вопросу об общей связи между классическими и квантовыми законами. В течение по крайней мере пятидесяти лет мы пользуемся одновременно и классическими и квантовыми законами, несмотря на непримиримость их основных посылок. Так, например, мы считаем, что внутриаомные планетарные электроны движутся по своим орбитам сообразно законам классической электродинамики; перескоки же между ними совершенно не подчиняются этим законам. Энергии электронных орбит в атоме водо-

¹ Поскольку в настоящее время справедливость правила h считается доказанной, им обычно и пользуются при вычислении энергий различных состояний атома. Беря полученные таким образом значения для проверки самого правила, мы, очевидно, попали бы в порочный круг.

рода вычисляются по классическим законам; целью же вычисления является проверка правила h , противоречащего всей классической теории излучения. Вся эта процедура явно противоречива, но, как это ни странно, приводит к блестящим успехам.

В моей обсерватории имеется телескоп, бросающий свет звезды на пластинку патрия в фотоэлементе. При прохождении света через линзы я полагаюсь на классическую теорию; как только свет начинает вырывать электроны из пластинки, я перехожу к квантовой теории. Квантовая теория утверждает, что свет никогда не соберется в фокусе линзы; классическая же теория лишает его возможности вырывать электроны из пластинки. Логически рассуждая, я должен был бы пользоваться только одной из этих теорий; опыт же показывает, что этого делать нельзя. Как справедливо выразился сэр Уильям Брэгг, мы пользуемся классической теорией по понедельникам, средам и пятницам, а квантовой—по вторникам, четвергам и субботам. Это должно было бы сделать нас более сплоснутыми по отношению к тем, у которых в будни одна философия, а по воскресеньям—другая.

Мы должны стремиться к такой перестройке основных понятий физики, которая дала бы возможность установить единство между классическими и квантовыми законами. Некоторые еще думают, что это единство может быть достигнуто на основе дальнейшего развития классических понятий. Другие же физики, принадлежащие к так называемой „копенгагенской школе“, считают, что перестройка должна идти с другого конца, т. е. что квантовые явления дают нам возможность более глубоко проникнуть в тайны природы, чем те сравнительно грубые опыты, на которых базируются классические законы. Классическая школа старается представить кванты действия просто как результат производства мелких пред-

метов, копенгагенская же школа рассматривает их как те составные элементы, на которые распадается пространство, время и материя. По-моему, для копенгагенской школы в данном случае решающими являются не те громадные трудности, которые возникают при попытках построения мелких „порций“ из классического материала, а те результаты, к которым приводит изучение точек соприкосновения обеих враждебных теорий.

Классические законы представляют собою тот предел, к которому стремятся квантовые законы при переходе к очень большим значениям квантовых чисел.

В этом состоит знаменитый принцип соответствия, высказанный Бором. Первое время его можно было рассматривать только как предположение, не имеющее серьезных подтверждений. Но по мере дальнейшего развития квантовых законов было доказано, что при переходе к очень большим квантовым числам они дают в пределе классические законы и приводят к тем же следствиям, что и последние.

Рассмотрим, например, атом водорода, в котором электрон находится на круговой орбите с очень большим квантовым числом, т. е. очень удален от протона. По понедельникам, средам и пятницам он подчиняется классическим законам. Согласно этим законам электрон дает непрерывное излучение, интенсивность которого определяется ускорением электрона, а период—периодом его собственного вращения. Благодаря непрерывной потере энергии электрон по спирали приближается к протону. По вторникам, четвергам и субботам он подчиняется квантовым законам и перескакивает с одной орбиты на другую. В числе этих законов есть один (о нем я выше не упоминал), согласно которому электрон с одной круговой орбиты может перескакивать только на непосредственно следующую, т. е. спускаться по всем

ступенькам, не пропуская ни одной. Паряду с ним имеется еще один закон, который определяет средних промежутков времени между двумя перескоками, т. е. двумя последовательными атаками излучения. Небольшие порции энергии, теряемые атомом при каждом перескоке, образуют световые волны, период которых определяется правилом h .

„Но что за нелепость! Неужели вы действительно думаете, что электрон ведет себя по-разному в зависимости от дня недели?“

Разве я говорил, что он ведет себя по-разному? Я только по-разному описывал его поведение. По четвергам я могу сходить по ступенькам, а по пятницам соскальзывать по перилам; но если лестница состоит из бесконечно большого числа бесконечно малых ступенек, то существенной разницы в способе моего спуска не будет. Точно так же при бесконечно малой величине перескоков нет никакой разницы между перескоком электрона с высшей орбиты на низшую и непрерывным спусканием его по спирали. Последовательность бесконечно малых порций энергии превращается в непрерывный поток. Говоря языком формул, при бесконечно больших квантовых числах период и интенсивность излучения получаются одинаковыми независимо от того, какой метод был применен при их вычислении—классический или квантовый. Даже при конечных (но больших) квантовых числах оба метода дают результаты, весьма мало отличающиеся друг от друга. Только при малых квантовых числах атому приходится выбирать между „понедельником“ (классическими законами) и „вторником“ (квантовыми законами). Он выбирает „вторник“.

Этот типичный пример показывает, в каком направлении должна пойти перестройка наших понятий. Исходить из классических представлений, очевидно, нельзя, поскольку эти представления получают смысл

только в предельном случае очень больших квантовых чисел. Следовательно, в основу должны быть положены новые представления, имеющие смысл для любых значений квантовых чисел и по мере возрастания этих чисел постепенно переходящие в классические. Трудно сейчас предвидеть все результаты этой перестройки. Вероятно, вместо классического представления об удерживающих тело силах придется ввести фундаментальное понятие „состояния“. Во всяком случае для состояний, характеризующихся небольшими квантовыми числами, обычная физическая терминология оказывается непригодной, и пользование ею (без чего сейчас нельзя обойтись) ведет к ряду противоречий. Для таких состояний пространство и время не существуют,—по крайней мере, у меня нет никаких оснований предполагать их существующими. Но для состояний с большими квантовыми числами новая схема должна давать нечто аналогичное обычным понятиям пространства и времени, т. е. нечто, переходящее в пространство и время при безграничном возрастании этих чисел. Паряду с этим взаимодействие, выражающееся в переходах из одного состояния в другое, должно в пределе давать классические силы, действующие в пространстве и во времени. Таким образом в пределе классическая схема становится пригодной. На практике мы почти всегда имеем дело с системами со сравнительно слабыми связями, характеризующимися очень большими квантовыми числами. Поэтому первоначальные наблюдения над миром привели нас к классическим законам и к таким понятиям, которые приобретают смысл только для больших квантовых чисел. Но внутри атомов и молекул в излучении, а также, повидимому, в звездах очень большой плотности, вроде, например, спутника Сириуса, эти понятия неприменимы. Приходится возвращаться к более фундаментальным понятиям, из ко-

торых классические (достаточные для известного класса явлений) получаются как предельный случай.

В качестве иллюстрации я возьму одно из квантовых представлений, изложенных в следующей главе. Возможно, что при теперешней быстрой эволюции идей это представление будет скоро оставлено, но здесь я его беру просто как иллюстрацию. В боровской полуклассической модели атома водорода имеется электрон, описывающий круговую или эллиптическую орбиту. По это только модель,—в реальном атоме нет ничего подобного. Реальный атом содержит нечто, чего человеческий ум не может себе конкретно представить, но что было символически описано Шредингером. Это „нечто“ распространено по всему пространству и не имеет ни малейшего сходства с электроном, движущимся по определенной орбите. Будем теперь переводить атом во все более и более высокие квантовые состояния. В боровской модели это соответствует перескокам электрона на все более и более отдаленные орбиты. В реальном же атоме Шредингера „нечто“ будет при этом все более и более „сгущаться“, и мало-помалу начнет вырисовываться боровская орбита. При еще больших квантовых числах шредингеровскому символу будет соответствовать компактное тело, вращающееся по той же орбите, с тем же периодом, что и электрон в боровской модели, и излучающее сообразно классическим законам. Когда квантовые числа делаются бесконечно большими, атом „разверзается“, и из его недр появляется классический электрон. Таким образом электрон выкристаллизовывается из шредингеровского тумана, как чорт, вылезающий из бутылки.

Глава VI. НОВАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Конфликт между квантовой и классической теориями особенно резко проявляется в проблеме распространения света. Здесь он по сути дела превращается в конфликт между корпускулярной и волновой теориями света.

В былые время очень многих интересовал вопрос: каковы размеры светового кванта? Один ответ на этот вопрос можно дать, рассматривая изображение звезды в 100-дюймовом рефлекторе на Маунт-Вильсоне. Дифракционная картина показывает, что излучение каждого атома должно покрывать все зеркало. В самом деле, если бы один атом освещал только одну часть зеркала, а другой атом—только другую часть, то мы должны были бы получать один и тот же эффект, освещая различные части зеркала различными звездами (так как безразлично, находятся ли данные атомы на одной или на разных звездах). Фактически же дифракционная картина получается в обоих случаях не одна и та же. Следовательно, квант должен быть настолько большим, чтобы покрыть всю поверхность 100-дюймового зеркала.

Но, когда тот же самый свет без всякого предварительного фокусирования падает на калиевую пластинку, из последней начинают вылетать электроны, энергия каждого из которых равна энергии целого кванта. Свет здесь не просто освобождает энергию, уже накопленную в атоме, так как величина энергии определяется свойствами света, а не атома: световой

квант попадает в атом и выбивает из него электрон. Следовательно, квант должен быть настолько малым, чтобы иметь возможность попасть внутрь атома.

Причина получающегося противоречия ясна. Говорить о пространстве и времени, имея дело с одним квантовым индивидуумом, не имеет смысла. В частности, не имеет смысла понятие пространственной протяженности кванта. Нельзя сказать, что каждый квант, пробыв в пути 8 лет, проделал путь в 50 триллионов миль от Сириуса до Земли. Но если имеется известное количество квантов, достаточное для образования кворума, то эта совокупность обладает определенными статистическими свойствами, к которым и сводится существование расстояния в 50 триллионов миль, или в 8 световых лет.

ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ

Итак, постановка проблемы ясна. Гораздо труднее приступить к ее разрешению. Прежде чем приступить к детальному разбору тех попыток, которые делались в этом направлении за последние два года, рассмотрим вкратце несколько менее глубокий подход к задаче, предложенный де-Бройлем. Будем пока считаться с тайнами, как с тайнами. Свет, с одной стороны, есть нечто, распыляющееся подобно волне по поверхности огромного объектива и обладающее хорошо известными свойствами интерференции и дифракции; с другой стороны, он, подобно корпускуле, обладает способностью сосредоточить всю свою энергию на очень небольшом участке. Такое „нечто“ нельзя назвать ни волной, ни частицей; выберем пока промежуточное название: „волно-частица“.

„Ничто не ново под луною“, — и этот недавний поворот почти возвращает нас к ньютоповской теории света, этой любопытной смеси корпускулярной и волновой теории. Для многих это „возвращение к

Ньютону“ будет приятно. Но думать, что научная репутация Ньютона возносится на новую высоту теорией света де-Бройля, так же бессмысленно, как думать, что она опорочивается теорией тяготения Эйнштейна. Все известные Ньютопу явления могут быть прекрасно объяснены волновой теорией, и опровержение тех доказательств, которые приводил Ньютон в пользу своей полукорпускулярной теории, является таким же успехом науки, как открытие тех фактов, которые теперь заставляют нас отчасти вернуться к этой теории. Думать, что революция современной науки заставляет научную репутацию Ньютона скакать то вверх, то вниз, значит смешивать науку с всезнанием.

Но вернемся к волно-частице. Если то, что мы все время считали волной, обладает некоторыми свойствами частицы, то не может ли случиться и обратно: что тела, которые мы считали частицами, обладают свойствами волн? До последнего столетия никто и не пытался ставить опыты, должныствующие обнаружить корпускулярную сторону природы света; может быть, существуют и такие опыты, которые способны обнаружить волновую сторону природы электрона?

Таким образом мы с первого же шага, вместо того чтобы попытаться разгадать тайну, углубляем ее. Вместо того чтобы объяснить, каким образом одно и то же тело может одновременно обладать свойствами волны и частицы, мы стремимся показать, что эти свойства неразрывно связаны друг с другом. Не существует ни просто волн, ни просто частиц.

Одним из наиболее характерных следствий волновой теории является распыление луча света после прохождения через узкое отверстие, т. е. хорошо известное явление дифракции. Этот эффект выражен тем резче, чем больше длина волны света. Де-Бройль показал, каким образом можно вычислять длину волны, связанной с электроном, если рассматривать последний не

просто как частицу, а как волно-частицу. Оказывается, что в известных случаях дифракцию этих волн можно обнаружить на опыте. В настоящее время уже имеется целый ряд экспериментальных результатов, подтверждающих наличие такой дифракции. Трудно сейчас сказать, насколько эти результаты окончательны; во всяком случае ясно, что при рассеянии электронов атомами наблюдаются такие явления, которые не могли бы иметь места, если бы электрон был просто частицей. Эти эффекты аналогичны интерференции и дифракции света, объяснение которых является наиболее сильным местом волновой теории. В свое время такого рода явления опровергли чисто корпускулярную теорию света; может быть, теперь они послужат к опровержению чисто корпускулярной теории материи¹.

С аналогичными идеями мы уже встречались в „новой статистической механике“ Эйнштейна-Бозе: по крайней мере такова была та физическая интерпретация, которую можно было дать абстрактным математическим положениям этой теории. Как это часто бывает, переход от классических представлений к новым, имеющих громадное принципиальное значение, в практических проблемах сводится к очень незначительным поправкам. Существенного различия можно ожидать только в тех случаях, когда плотность материи значительно превышает все известные до сих пор значения. Благодаря какой-то случайности как раз тогда, когда выяснилось, что очень сгущенная материя может обладать свойствами, непонятными с точки зрения классических представлений, во вселенной были обнаружены скопления материи, обладающие громадной плотностью. Астрономические

исследования показали, что плотность материи в так называемых „белых карликовых звездах“ на много превышает все известные на Земле значения; например, в спутнике Сириуса она достигает 1 т на кубический дюйм. Появление таких больших плотностей объясняется тем, что при очень высоких температурах и соответственно очень быстром движении атомов последние лишаются своих внешних электронных слоев (ионизируются) и потому получают возможность более тесно сблизиться друг с другом. При обычных температурах атомное ядро охраняется внешними электронами, мешающими другим атомам близко подойти к ядру (даже при высоких давлениях); при звездных же температурах движение атомов настолько энергично, что электроны покидают свой пост и разбегаются по сторонам, так что при очень высоких давлениях делается возможной очень высокая конденсация материи. Фаулер показал, что в белых карликовых звездах, т. е. при громадной плотности, классические методы неприменимы, и приходится пользоваться новой статистической механикой. В частности, он тем самым избавил нас от вечного беспокойства по судьбу этих звезд: по классической теории получалось, что они должны непрерывно терять тепло и в то же время не обладают энергией, необходимой для охлаждения¹.

ПЕРЕХОД К НОВОЙ ТЕОРИИ

К 1925 г. первоначальная квантовая теория дала новую трещину,—окончательно рухнула боровская модель атома. Согласно этой модели, как уже говорилось,

¹ Трата энергии при охлаждении объясняется тем, что плотность материи уменьшается и, следовательно, объем звезды увеличивается, т. е. производится работа против действия силы тяжести.

¹ Со времени появления этих лекций количество экспериментальных подтверждений новой теории значительно увеличилось.

атом представляет собой своего рода солнечную систему с центральным положительным ядром и планетарными электронами. Возможно, орбиты подчинены определенным условиям, о которых мы говорили на стр. 112.

Так как каждая спектральная линия атома излучается при перескоке электрона с одной орбиты на другую, параллельно классификации спектральных линий должна идти классификация орбит по их квантовым числам. При изучении различных серий спектральных линий оказалось возможным приписать каждой линии определенный перескок, т. е. объяснить ее существование, исходя из модели Бора. Однако работы последнего времени показали, что для более тонких деталей спектра этого соответствия установить нельзя. Поскольку вообще от всякой модели нечего ожидать особенно многого, было бы неудивительно, если бы она оказалась просто не совсем точной. Но в действительности получаются затруднения совсем другого порядка: трем спектральным линиям соответствуют по модели только два перескока и т. д. Боровская модель, которая до сих пор весьма удачно интерпретировала все спектры, внезапно оказалась непригодной, так что спектроскопистам пришлось начать проводить классификацию линий другими методами. Они еще продолжали говорить об орбитах и перескоках, но полного однозначного соответствия с орбитами, показанными на модели, уже не было¹.

К этому времени необходимость новой теории сделалась совершенно очевидной. Создавшееся тогда положение можно вкратце формулировать так.

¹ Для определения каждой орбиты (или состояний) атома требуется задание трех (в уточненной теории четырех) квантовых чисел. Первые два из них правильно даются боровской моделью; третье же, определяющее мультиплетную структуру спектра, дается неправильно, что еще хуже, чем если бы оно не давалось совсем.

1) При решении любой проблемы пользовались классическими законами, дополненными следующим вспомогательным правилом: все величины, имеющие размерность действия, должны быть равны h или целому кратному h .

2) Такой ход рассуждений часто приводил к внутренним противоречиям. Так, например, в боровском атоме ускорение электрона вычислялось на основании законов классической электродинамики, а излучение его — на основании правила h . Но в классической электродинамике ускорение и излучение неразрывно связаны друг с другом.

3) Истинное значение классических законов как того предела, к которому стремятся более общие законы при безграничном возрастании числа квант, было известно. Отсюда понятно, почему исходным пунктом всех попыток построения новой схемы законов природы должно было послужить освобождение от классических понятий, имеющих смысл только в предельном случае.

4) В качестве компромисса признавалось, что свет имеет и корпускулярные и волновые свойства. Эта идея была распространена и на материю и подтверждена опытом. Но этот успех еще более подчеркнул необходимость создания единой, лишенной внутренних противоречий теории, которая объясняла бы одновременное существование корпускулярных и волновых свойств.

5) Хотя вышеупомянутое вспомогательное правило в общем приводило к правильным результатам, оно давало такое распределение электронных орбит в атоме, которое во многом отличалось от данных спектроскопии. Таким образом необходимость перестройки вызывалась не только требованиями логической стройности, но и чисто конкретными запросами практической физики.

РАЗВИТИЕ НОВОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Первым толчком к развитию новой квантовой теории послужила замечательная работа Гейзенберга, появившаяся осенью 1925 г. Настоящие лекции прочитаны примерно через год после опубликования этой работы. Для развития новой теории год—очень небольшой срок; однако за это время теория уже успела пройти через три отдельные фазы, связанные соответственно с именами Борна и Нордана, Дирака, Шредингера. Надеюсь, что пока эти лекции появятся в свет, мы вступим уже в новую, четвертую фазу. По сути дела пройденные нами три фазы представляют собой три самостоятельные теории. Хотя в центре всего продолжает стоять первая работа Гейзенберга, основные идеи всех трех теорий глубоко отличны друг от друга. Первая нащупывала новый путь развития, оставаясь на чисто конкретной почве; вторая была, наоборот, чрезвычайно абстрактной и почти мистической; третья же, на первый взгляд, содержала известный возврат к классическим идеям (повидимому, это первое впечатление оказалось ошибочным). Отсюда можно понять, какая анархия царит в области квантовой физики, где в течение одного года трон захватывался по очереди тремя претендентами. Успехи же, сделанные за это время, можно понять, только ознакомившись с математической стороной предмета. С философской точки зрения все три теории диаметрально противоположны друг другу, с математической же точки зрения они совершенно тождественны. К сожалению, именно о математике мне в этих лекциях нельзя сказать ни слова.

Я позволю себе, однако, нарушить это запрещение и написать здесь одну математическую формулу, несколько, впрочем, не рассчитывая, что вы ее поймете.

Все авторитеты сходятся на том, что корень загадки физического мира лежит в мистической формуле:

$$qp - pq = \frac{ih}{2\pi}.$$

Значения этой формулы мы не понимаем; может быть, если бы мы его поняли, она не казалась бы нам столь фундаментальной. Однако опытный математик может ею пользоваться, и с ее помощью за последние два года в физике был получен целый ряд весьма ценных результатов. Исходя из этой формулы, удалось объяснить не только явления, описываемые старыми квантовыми законами, вроде правила h , но и те явления, которые не могла охватить старая формулировка.

В правой части формулы стоит атом действия h , простой численный фактор 2π и корень квадратный из -1 , который, на первый взгляд, может показаться чем-то мистическим. Но, по сути дела, это просто кунштюк, хорошо известный уже физикам и техникам прошлого столетия, для которых появление $\sqrt{-1}$ в формулах было равносильно присутствию каких-то волн или колебаний. Таким образом правая часть формулы не содержит ничего необычного. Но зато левая часть ее поистине удивительна. Величины q и p , следуя классической пространственно-временной терминологии, суть координаты и моменты. Но это ничего нам не говорит об их истинной природе и не объясняет, почему qp так плохо ведет себя, что не хочет быть равным pq .

Именно в этом пункте мы имеем наиболее существенные разногласия между тремя теориями. Ясно, что q и p не могут быть простыми числами, так как тогда $qp - pq$ равнялось бы нулю. Для Шредингера p есть оператор. С его точки зрения „момент“ не есть какая-то определенная величина, а просто указание

на необходимость произвести известную математическую операцию над стоящими за ним величинами. Для Борна и Иордана p есть матрица, т. е. не одна или несколько величин, а бесчисленное множество величин, расположенных в определенном порядке. Для Дирака p есть символ, лишенный всякой численной интерпретации. Он называет его q -числом, тем самым указывая, что это вовсе не число.

Мне кажется, что в дираковском подходе заложена одна мысль, имеющая большое философское значение независимо от тех или иных его практических применений. Эта мысль заключается в том, что, проникая все глубже и глубже в основы физических явлений, мы должны быть готовы встретиться с такими величинами, которые не могут быть выражены числами. Дирак показал, что на такой основе может быть построена точная наука, т. е. имеющая дело с измерениями, результаты которых выражаются числами.

В настоящее время мы представляем себе идеальное научное объяснение совершенно иначе, чем в прошлом столетии. Физики второй половины XIX в. считали понятной только такую вещь, для которой можно было построить модель, т. е. известную конструкцию из рычагов, колес, винтов и других механических приспособлений. По их мнению природа, строя вселенную, не имела в своем распоряжении других средств кроме тех, которые известны современному инженеру; так что объяснить данное явление—значит вскрыть лежащий в его основе механизм. Человек, который объяснил бы тяготение действием механизма из зубчатых колес, был бы героем того времени.

Теперь же мы с просьбой построить мир обращаемся не к инженеру, а к математику. Конечно, хотя математик ставит себя выше инженера, но и ему нельзя полностью доверить дело „сотворения мира“. Поскольку в физике мы имеем дело с миром символов, мы не можем в ней обойтись без помощи

математика—профессионального специалиста по этой части; но при этом он должен попытаться всю важность порученного ему дела и постараться отвлечься от предвзятой привычки давать каждому символу арифметическую интерпретацию. Мы стремимся познать истинные законы природы, и потому не должны стараться загонять их в рамки, которые, на первый взгляд, естественно даются нашим интеллектом.

Мне кажется, что в принципе дираковский метод дает нам эту свободу. Дирак исходит из некоторых основных величин, которые нельзя выразить при помощи чисел. Его основные законы представляют собою символические выражения, не связанные с арифметическими операциями. Центральным пунктом теории является то, что по мере хода исследования из символов получаются реальные числа. Так, хотя и p и q не имеют арифметической интерпретации, комбинации $qp—pq$ соответствует определенное число, даваемое вышеприведенной формулой. Поэтому теория Дирака, хотя сама по себе и не имеет дела с числами, может приводить к численным результатам и, таким образом, служит для истолкования научных измерений. Численные результаты измерений, представляющие собою все, что мы можем узнать из наблюдений над внешним миром, не охватывают всей вселенной и даже не управляются собственными внутренними законами. Только так можно истолковать попытку Дирака выразить истинные законы точной науки при помощи неарифметического исчисления.

В настоящее время еще рано предсказывать все следствия, которые повлечет за собой дираковский метод. В данный момент Шредингер во многом снял покров таинственности с p и q , показав, что для практических применений достаточно менее абстрактная интерпретация этих величин. Но, по-моему, все эти идеи еще не достигли своего окончательного развития.

Шредингеровская теория находится сейчас в зените своей популярности. Я думаю, что эта популярность наряду с внутренними достоинствами теории объясняется отчасти и ее сравнительной простотой (по сравнению с остальными двумя теориями). Несмотря на известное предубеждение, я все же дам здесь краткий очерк этой теории. Возможно, что лучше было бы на дверях, ведущих к квантовой теории, прибить дощечку с надписью: „Производится капитальный ремонт; вход только по делу“. Пока, однако, я выскажу только свое мнение, что, хотя теория Шредингера ведет к блестящим и быстрым математическим успехам и практическая ценность ее неоспорима, вряд ли идеи ее автора сохранятся в своей прежней форме.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ШРЕДИНГЕРА

Представьте себе своего рода субэфир, поверхность которого покрыта волнами. Колебания этих волн происходят в миллион раз быстрее, чем колебания видимого света, и потому не смогут быть обнаружены нашими грубыми опытами. Каждую волну в отдельности мы увидеть не можем; наблюдать можно только комбинированное действие весьма большого числа волн, вызывающее возмущение на поверхности, площадь которой велика по сравнению с размерами каждой волны, хотя и мала с нашей точки зрения. Каждая такая покрытая волнами площадка представляет собою материальную частицу, например электрон.

Субэфир является диспергирующей средой, т. е. скорость распространения волн в нем различна в зависимости от длины волны (периода колебаний). Чем быстрее происходит колебание, тем больше скорость его распространения. Кроме того, на скорость

волн влияют также и свойства данной области (т. е., говоря языком классической физики, свойства силового поля). Ясно, что, поскольку мы сводим все явления к распространению волн, влияние каждого тела на происходящие в его соседстве физические процессы (обычно приписываемое силовому полю) должно выражаться в изменении распространения волн при прохождении через область, окружающую данное тело.

Каким же образом явления, происходящие в субэфире, связаны с явлениями, лежащими в сфере нашего опыта? Как мы только что говорили, существование покрытой волнами области мы воспринимаем как присутствие материальной частицы. Частота же волн (т. е. число колебаний в секунду) воспринимается нами как энергия частицы. Я постараюсь сейчас объяснить, почему величина периода волн проявляется на опыте таким, на первый взгляд, непонятным образом. Пока же отметим, что признание этой связи между частотой субэфира и энергией непосредственно приводит к правилу h .

Вообще говоря, колебания в субэфире происходят слишком быстро, для того чтобы их можно было обнаружить на опыте. Однако частота их все же проявляется в наблюдаемых явлениях, поскольку она (как уже указывалось выше) влияет на скорость распространения волн. Уравнение, выражающее закон этого распространения, должно поэтому содержать ν (через ν мы будем в дальнейшем обозначать частоту). Но кроме этого в уравнение должен входить и другой член, выражающий влияние „силового поля“ находящихся вблизи тел. Его можно рассматривать как своего рода „добавочное ν “, поскольку на результаты опытов он влияет так же, как обыкновенная частота. Так как ν мы воспринимаем как энергию, то добавочному ν должна, очевидно, соответствовать какая-то добавочная энергия. В клас-

сической механике эта добавочная энергия носит название потенциальной (действительно, как известно, потенциальная энергия зависит от расположения окружающих предметов).

Зная действительную и „потенциальную“ частоту, можно написать уравнение волны и решить любую проблему, связанную с распространением волн. В частности, можно определить движение покрытых волнами площадок. При этом получается замечательный результат: оказывается, что такие площадки (если только они достаточно малы) движутся по совершенно тем же законам, что и материальные частицы в классической механике. Уравнения движения группы волн с данными значениями частоты и потенциальной частоты в точности совпадают с классическими уравнениями движения частицы с соответствующими значениями энергии и потенциальной энергии.

Заметим, что скорость покрытой волнами площадки или группы волн не совпадает со скоростью каждой волны в отдельности. Это различие между „групповой“ и „фазовой“ скоростью хорошо известно на примере водяных волн. При движении материальной частицы мы наблюдаем именно групповую скорость.

Если бы вся теория Шредингера сводилась к получению классических результатов на новой, несколько фантастической, основе, польза ее была бы весьма невелика. Ценность такой теории проявляется, по-настоящему, только в тех явлениях, где классическая механика оказывается непригодной. Наряду с очень малыми площадками, положение которых так же определено, как положение классической частицы, можно рассматривать и более обширные площадки. Поскольку точной границы между большими и маленькими площадками провести нельзя, мы будем и с теми и с другими связывать представление о материальных частицах. Но, в то время как в первом

случае положение частицы вполне определено, во втором случае оно может колебаться в довольно широких пределах. С классической точки зрения расплывчатой группе волн соответствует такая частица, которая связана не с одной точкой пространства, а с целой обширной областью.

Отсюда, однако, не следует, что обширная площадка, покрытая волнами, изображает рассеянную материю (в противоположность концентрированной частице). В теории Шредингера расплывчатой группе волн соответствует не разбросанная по пространству материя, а неопределенность положения частицы, т. е. такое состояние, когда существует определенная вероятность местонахождения частицы в любой точке, лежащей в известных пределах. Таким образом, если шредингеровские волны равномерно распределены по какому-нибудь сосуду, то это означает не то, что сосуд наполнен материей, обладающей постоянной плотностью, а то, что в нем находится одна частица, все местоположения которой равновероятны.

Первым большим успехом теории Шредингера было полное решение проблемы изучения водородного атома, на которой классическая теория показала свою беспомощность. Рассуждая по Шредингеру, мы должны прежде всего определить то, что соответствует протону и электрону (образующим водородный атом) в субэфире. Поскольку в нашу задачу не входит исследование движения протона, нас интересуют не составляющие его волны, а лишь его поле сил, т. е. добавочное ψ , которое протон дает в волновом уравнении электрона. Согласно основному предположению Шредингера волны, распространение которых определяется этим последним уравнением, эквивалентны классическому электрону. Каждому решению волнового уравнения электрона соответствует возможное состояние водородного атома. Оказывается, что (если ограничиться волнами, амплитуда которых всюду ко-

нечна) волновое уравнение имеет решение только при определенных значениях частоты. Таким образом частота субэфирных волн, изображающих атом водорода, может принимать только одно из дискретного ряда значений. А так как частота субэфира воспринимается нами на опыте как энергия, то отсюда следует, что для энергии атома существует дискретный ряд возможных значений. Эти дискретные значения, даваемые теорией Шредингера, в точности совпадают со значениями, найденными Бором на основании правил квантования (стр. 112). То, что мы раньше получали, исходя из необъяснимого математического правила, теперь получается как естественное следствие волновой теории. Далее, при переходе к более сложным атомам, теория Шредингера блестяще оправдывается как раз на тех проблемах, где модель Бора оказывается непригодной. Вычисленные согласно ее данным „орбиты“ в точности совпадают с требованиями спектроскопии.

Проследим несколько дальше ход событий, происходящих в субэфире, не переходя пока от волновой частоты к классической энергии. Вряд ли можно представить себе классический электрон, обладающий одновременно двумя значениями энергии (т. е. находящийся сразу на двух боровских орбитах). Одновременное же присутствие двух волн с различными частотами в субэфире вполне возможно. Таким образом волновая теория позволяет нам легко представить себе такое положение вещей, которое с классической точки зрения кажется явно парадоксальным. Итак, допустим, что мы имеем одновременно все системы волн. Как известно, две системы волн с близкими друг к другу частотами дают „биения“. Когда, например, две отправительные станции работают на близких друг к другу длинах волн, мы слышим музыкальную ноту, являющуюся результатом биений: колебания каждой волны в отдельности идут

слишком быстро для того, чтобы быть восприимчивыми ухом; получающиеся же при сложении их биения идут достаточно медленно для того, чтобы быть услышанными. Аналогично, период каждой субэфирной системы волн в отдельности слишком мал для того, чтобы она могла повлиять на наши органы чувств; даваемые же двумя такими системами биения иногда попадают в область видимых длин волн. Эти биения являются источником света, излучаемого водородным атомом; вычисления показывают, что их частоты в точности совпадают с наблюдаемыми частотами спектральных линий водорода. Подобно тому как интерференция радиоволн порождает звук, интерференция субэфирных волн порождает свет. Теория Шредингера дает возможность определить не только частоты спектральных линий, но и их интенсивности, относительно которых старая квантовая теория не могла ничего сказать. Эти биения не нужно, однако, непосредственно отождествлять со световыми волнами, поскольку распространение последних происходит не в субэфире, а в эфире. Биения волн представляют собою только источник колебаний, который неизвестным пока путем посылает световые волны того же периода.

Что же представляет собою та величина, которую мы предполагаем колеблющейся, говоря о волнах в субэфире? С точки зрения волновой теории эта величина, обозначаемая обычно через ϕ , является элементарной и не поддается дальнейшему определению. Но можно ли дать ей какую-нибудь классическую интерпретацию? Оказывается, что ϕ можно интерпретировать как вероятность, т. е. положить вероятность местонахождения частицы или электрона в данной области пропорциональной значению ϕ в этой области. Таким образом, если ϕ исчезает повсюду, кроме маленькой покрытой волнами площадки, то можно с уверенностью сказать, что элек-

трон находится именно на этой площадке. В этом случае мы можем приписать электрону вполне определенное местонахождение и рассматривать его как классическую частицу. В водородном же атоме ϕ -волны распространены по всему объему атома, так что точного местонахождения электрона указать нельзя, хотя некоторые из его местоположений более вероятны, чем другие¹.

Отметим еще одно существенное следствие теории Шредингера. Как мы уже говорили, достаточно малая, покрытая волнами, область субэфира по своим свойствам весьма походит на частицу, подчиняющуюся классическим законам движения. Отсюда можно было бы заключить, что при стягивании покрытой волнами площадки в одну точку она в пределе становится обыкновенной материальной точкой. Однако в действительности это не так: как бы мы ни уменьшали размеры площадки, свойства ее никогда не сделаются совершенно тождественными свойствам классической частицы, а будут то приближаться, то удаляться от них. Действительно, как мы видели выше, движение группы волн аналогично движению частицы (расположенной где-то на покрытой волнами площадке), энергия которой соответствует частоте волн. Следовательно, для того чтобы в точности походить на

¹ Часто полагают вероятность пропорциональной не ϕ , а ϕ^2 . Весь вопрос об интерпретации ϕ чрезвычайно сложен; во всяком случае, речь здесь, повидимому, идет о том, рассматривать ли вероятность до или после того, как данное событие уже произошло. Выражение ϕ^2 получается путем введения двух симметрических систем ϕ -волн с противоположными направлениями во времени, одна из которых выражает влияние тех условий, которые имели место после совершения данного события. Вообще говоря, вероятность имеет смысл только в связи с „имеющимися у нас сведениями“, так что возможно, что ее просто нельзя выразить одной и той же функцией для различных проблем с различными начальными условиями.

частицу, группа волн должна не только быть стянутой в одну точку, но и состоять из волн одной определенной частоты. Но одно из этих условий исключает другое. В результате интерференции волн одинакового периода получается система волн, не ограниченная в пространстве. Группа волн, результирующая которых отлична от нуля только на ограниченной площадке, получается путем интерференции волн слегка различной длины, которые усиливают друг друга в середине и уничтожаются по краям. Грубое говоря, если диаметр группы равен 1000 длинам волн, то это значит, что она складывается из волн, длина которых меняется в пределах 0,1%, так что 1000 самых длинных и 1001 самых коротких волн укладываются на одинаковом отрезке. Если мы захотим уменьшить диаметр покрытой волнами поверхности до 10 длин волн, то придется брать волны, длина которых меняется в пределах 10%, так что 10 самых длинных и 11 самых коротких волн укладываются на одинаковом отрезке. Стремясь сделать положение частицы более определенным путем уменьшения покрытой волнами площадки, мы одновременно делаем ее энергию более расплывчатой, так как пределы, в которых заключена частота волн, увеличиваются. Таким образом наша частица не может одновременно обладать и определенным положением и определенной энергией; или в том или в другом отношении получается известная расплывчатость, отсутствующая в классической теории. Поэтому при большой точности эксперимента неизбежно должны обнаружиться разногласия между действительным поведением материальных частиц и классическими законами. Повидимому, в этом и кроется объяснение недавних опытов с дифракцией электронов.

Как было уже отмечено выше, согласно теории Шредингера атом водорода может зараз обладать двумя значениями энергии (в теории Бора такая воз-

возможность, конечно, исключается). Для частицы или электрона эта неопределенность в величине энергии неизбежна,—иначе мы не могли бы указать, в пределах какой области находится данная частица. Классическое представление об электроне как о частице, обладающей вполне однозначной энергией, рушится. Истинную основу всех физических явлений нужно искать в субэфире. Однако в известных пределах точности можно продолжать пользоваться и понятием частицы. Например, если нам нужно знать энергию только с точностью до 1%, то все значения энергии, разность которых лежит в пределах 1%, можно рассматривать как одну определенную энергию.

До сих пор мы имели дело только с волнами, соответствующими одному электрону. Коснемся теперь вкратце проблемы двух электронов. На первый взгляд может показаться, что появление второго электрона не вносит ничего принципиально нового,—просто вместо одной покрытой волнами площадки нужно взять две. В действительности же дело обстоит вовсе не так просто. Две покрытых волнами площадки соответствуют не двум электронам, а одному электрону с неопределенным местоположением. До тех пор, пока имеется хотя малейшая вероятность того, что в данной области находится первый электрон, шредингеровские волны в этой области не могут изображать вероятность местонахождения там второго электрона. Каждый электрон заполняет своими волнами все трехмерное пространство, и Шредингер великодушно предоставляет ему это пространство в нераздельное пользование. Поэтому для двух электронов ему приходится брать шестимерный субэфир и в нем проделывать все рассуждения, аналогичные вышеизложенным. Таким образом, поманив нас некоторым подобием конкретной физической картины, Шредингер сейчас же отбросил свою приманку. Его субэфир существует не в реальном физическом пространстве,

а в „конфигурационном пространстве“, выдуманном математиками с вспомогательной целью, число измерений которого зависит от условий данной проблемы. Благодаря чистой случайности развитие теории началось с таких проблем, в которых конфигурационное пространство во многом аналогично физическому: это наводило на мысль о реальном существовании субэфирных волн.

Почти универсальная применимость волновой механики лишает нас всякой возможности смотреть на нее как на серьезную физическую теорию. Прекрасный пример этого мы имеем в виде одной из работ Дирака. В одной из проблем, решаемых им с помощью шредингеровских волн, частота волн соответствует числу систем определенного типа. Пишется волновое уравнение, причем оказывается, что оно (подобно случаю водородного атома) имеет решение только при определенных дискретных значениях частоты. Отсюда следует, что число систем рассматриваемого типа тоже имеет только дискретный ряд возможных значений. В данной проблеме этот последний ряд есть натуральный ряд целых чисел. Мы приходим, таким образом, к выводу, что число наших систем может быть равно 1, 2, 3, 4,..., но никогда не будет равно, например, $2^{3/4}$. Очень приятно, что результаты теории так хорошо согласуются с опытом! Но вряд ли отсюда можно заключить, что истинное объяснение факта употребления целых чисел для счета кроется в тех или иных свойствах системы волн.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Моя надежда на то, что четвертая версия новой квантовой теории будет дана еще до окончания настоящего курса лекций, не оправдалась. По запозданию получилось всего в несколько месяцев. Летом 1927 г. появилась новая работа Гейзенберга, и на этот раз

послужившая толчком к новому развитию, следствия которой были подробно разобраны Бором. Центральным пунктом ее является новый основной принцип, повидимому, не уступающий по значению принципу относительности. Я буду называть его здесь „принципом неопределенности“. Суть его может быть выражена следующим образом: частица может обладать или определенным местоположением, или определенной скоростью, но не ими обоими вместе.

Если примириться с известной неточностью и вместо достоверности говорить только о той или иной вероятности событий, то частице можно будет приписать и местоположение и скорость. Но по мере того как мы будем стремиться определять местоположение частицы со все большей и большей точностью, случится одна замечательная вещь: чем большей точности мы будем достигать, тем большей будет становиться неточность в определении скорости. Обратно, чем точнее мы будем знать скорость частицы, тем более неопределенным будет становиться ее положение.

Допустим, например, что нам нужно определить положение и скорость электрона в данный момент времени. Теоретически положение его мы можем измерить с точностью до $0,001 \text{ м.м.}$, а скорость — с точностью до 1 км/сек. Ошибка в $0,001 \text{ м.м.}$ сравнительно велика при определенного рода пространственных измерениях, так что может возникнуть необходимость в увеличении точности измерений, скажем, до $0,0001 \text{ м.м.}$ Можно ли добиться такого увеличения? Конечно, но только тогда в измерениях скорости верхний предел ошибок возрастает до 10 км/сек.

Условия, в которых происходят наши исследования, таковы, что чем больше мы проникаем в тайну расположения предметов, тем больше остается от нас скрытой тайна их скорости. Положение и скорость подобны старике и старухе в барометре: как только

первый выходит из одной двери, вторая уходит за другую дверь.

Когда мы, измеряя какую-нибудь величину, наталкиваемся на неожиданное препятствие, то здесь можно поступать двояко. В некоторых случаях встречающиеся затруднения только поощряют к дальнейшим усилиям; в других же случаях дело обстоит иначе: искомая величина просто может оказаться несуществующей. Именно так теория относительности объясняет неудачу всех попыток измерить скорость земли по отношению к эфиру.

Если какая-нибудь величина систематически ускользает от наших измерений, то мы должны признать ее несуществующей. Выбора здесь не может быть. Поскольку с данной величиной не связан никакой поддающийся точному измерению эффект, эта величина просто нам неизвестна. Благодаря происходящим от времени до времени физическим открытиям некоторые величины иногда выходят из мрака неизвестности, получают определенную связь с опытными данными и соответствующее название. Но вряд ли особенно целесообразно иметь про запас для неизвестных величин кучу незаполненных ярлыков на том основании, что рано или поздно они могут пригодиться. Поэтому мы и утверждаем, что всякие попытки определить и положение и скорость электрона с точностью, превышающей определенную десятичную дробь, являются, по сути дела, попытками описать неизвестные нам вещи, хотя, как это ни странно, определение положения и скорости в отдельности возможно с любой степенью точности.

Со времени появления теории Эйнштейна, показавшей, что о физических величинах можно говорить только в связи с фактически производящимися измерениями, мы чрезвычайно остерегаемся употреблять термины, не имеющие смысла. В частности, под расстоянием мы понимаем результат определенных из-

мерительных операций, а не нечто расплывчатое, вроде „количества пустоты“ между двумя точками. Те небольшие расстояния, с которыми имеет дело физика атома, всегда вызывали в этом отношении известные сомнения, поскольку указать точный метод их измерения было очень трудно. Однако до последнего времени этот пункт не был окончательно выяснен, так как в известных случаях казалось возможным довести измерение внутриатомных расстояний до любой степени точности. Точно так же обстоит дело и с измерениями скорости. От внимания ускользнул только тот факт, что эти два типа измерений связаны друг с другом так, что одновременное существование положения и скорости, вполне реальное с макроскопической точки зрения, делается невозможным с микроскопической. Математически принцип неопределенности можно выразить так: если q есть координата, а p —соответствующий момент, то ошибка в измерении q , помноженная на ошибку в измерении p , всегда дает произведение, по порядку величины совпадающее с квантовой постоянной h .

Этому принципу легко дать общее обоснование. Допустим, что мы определяем положение и скорость электрона. Пока электрон не вступает во взаимодействие с остальными частями вселенной, мы о нем ничего не знаем. Только эффекты, вызываемые его взаимодействием с чем-нибудь, могут быть наблюдаемы и измерены. В каждом акте взаимодействия принимает участие целый квант. Переход же этого кванта существенно изменяет условия наблюдения, так что получаемые нами сведения уже в самый момент их получения не соответствуют действительности.

Предположим, что для точного определения местоположения электрона мы кладем его под сильно увеличивающий микроскоп. Для того чтобы электрон стал видимым, он должен рассеивать падающий откуда-то свет. Наименьшее количество рассеянного

света равно одному кванту. При каждом акте рассеяния электрон получает от света толчок, сила которого нам неизвестна,—мы можем определить только вероятность толчка той или иной силы. Таким образом, стремясь определить положение электрона, мы вынуждены как-то оттолкнуть его и тем самым лишить себя возможности точно определить его скорость. Ошибка, получающаяся при измерении скорости, зависит, очевидно, от силы толчка. Для того чтобы сделать ее возможно меньшей, нужно пользоваться квантами возможно меньшей энергии, т. е. светом возможно большей длины волн. Но чем больше длина волны света, тем менее точно изображение, даваемое микроскопом. Иначе говоря, при переходе к более длинным волнам увеличиваются размеры дифракционной картины. Как я уже говорил выше, в образовании каждой дифракционной картины участвует громадное количество квант, так что наш рассеянный квант, следуя законам случайности, попадает на один из атомов сетчатки, лежащей там, где должна была бы находиться дифракционная картина. Отсюда ясно: чем больше размеры дифракционной картины, тем больше неопределенность в положении электрона. Получается неразрешимая дилемма. Если мы захотим уточнить местоположение электрона, то снова должны будем перейти к более коротким волнам, которые придают электрону большие толчки, и тем самым мы увеличим ошибку в определении его скорости.

Такая же дилемма получится, если мы захотим увидеть электроны внутри атома. Для такой тонкой работы обычный свет не годится, так как длина волны его больше, чем размеры всего атома. Придется взять значительно более короткие волны—рентгеновские лучи. Известно, что рентгеновские лучи действуют на атомы несколько разрушительным образом, так что предпочтительнее пользоваться ими в умеренных количествах. Наименьшая возможная „порция“—это,

очевидно, один квант. Посмотрим теперь, что произойдет, если бросить один квант на атом. Пока квант не попадет на электрон, мы, очевидно, не увидим его. Наконец, удача! Мы попали в цель. Где же электрон? О, ужас! Он вылетел из атома.

Это не случайное недоразумение, а старательно подготовленный заговор: заговор, имеющий своей целью помешать нам определить то, чего не существует, т. е. местоположение электрона в атоме. Если бы я взял более длинные волны, то электрон остался бы на месте, но зато изображение его получилось бы чрезвычайно расплывчатым. Как только свет делается достаточно тонким, его квант делается слишком грубым и выбивает электрон из атома.

Можно дать целый ряд других примеров этой неопределенности, которая, несомненно, имеет общее значение. Частица, обладающая одновременно определенным местоположением и определенной скоростью, не может быть обнаружена просто потому, что ее не существует. Хорошей иллюстрацией к этому положению может служить шредингеровская модель частицы как группы волн. Выше мы видели, что чем более определенным становится местоположение группы волн, тем менее определенной становится ее энергия (частота), и наоборот. Основное достоинство теории Шредингера заключается, по-моему, именно в том, что она не наделяет материальную частицу отсутствующими в действительности свойствами. По ней не считаю принцип неопределенности следствием теории Шредингера. Этот принцип, подобно принципу относительности, сводится к отказу от ошибочного допущения, которое мы никогда не имеем оснований делать. Точно так же как по аналогии с материальным океаном мы приписываем эфиру несуществующие в действительности свойства, по аналогии с макроскопическими частицами мы наделяли микроскопические не имеющими реального смысла атрибутами.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Глава I. КРАХ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ	7
Структура атома	7
Фитц-джеральдово сокращение	11
Последствия сокращения	14
Системы отсчета	19
Возражения „обычного здравого смысла“	23
Резюме	26
Глава II. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ	28
Принцип Эйнштейна	28
Относительные и абсолютные величины	32
Схема мироздания	36
Скорость по отношению к эфиру	38
Реально ли фитц-джеральдово сокращение?	41
Резюме	43
Глава III. ВРЕМЯ	45
Время Королевской обсерватории	45
Расположение событий	50
Абсолютное, прошедшее и будущее	56
Абсолютное различие между пространством и временем	59
Четырехмерный мир	61
Скорость света	63
Практические применения	67
Резюме	70
Глава IV. ЗАКОНЫ ТЯГОТЕНИЯ	72
Человек в лифте	72
Новая картина тяготения	76
Новый закон тяготения	81
Закон движения	85

	Стр.
Относительность ускорения	91
Геометрия времени	95
Геометрия и механика	99
Глава V. ТЕОРИЯ КВАНТОВ	101
С чего все началось?	101
Атом действия	104
Конфликт с волновой теорией света	107
Теория атома	112
Связь квантовых законов с классическими	115
Глава VI. НОВАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ	121
Волновая теория материи	122
Переход к новой теории	125
Развитие новой квантовой теории	128
Основы теории Шредингера	132
Принципы неопределенности	141

Редакционную работу по этой книге провела *Н. А. Ершова*. Оформил книгу *А. И. Архангельский*. Корректуру держала *М. Х. Яковлева*. Рукопись сдана в набор в октябре 1932 г. Листы подписаны к печати в феврале 1933 г., книга вышла в свет в марте. Тираж 5000 экз. Бумага формата 72×105 см в $1/32$ $4\frac{5}{8}$ печ. л. Печатных знаков в книге 305000. Заказ № 6260

ГТТИ 641. Уполномоченный Главлита № В—45027.
Третья фабрика книги ОГИЗа РСФСР треста «Полиграф-книга» «Красный пролетарий». Москва Краснопролетарская 16.