

**ASSUMPTION AND MYTH
IN PHYSICAL THEORY**

BY
H. BONDI, F.R.S.

Professor of Applied Mathematics
at King's College
in the University of London

Cambridge
At the University Press
1967

Г. Бонди

**ГИПОТЕЗЫ И МИФЫ
В ФИЗИЧЕСКОЙ
ТЕОРИИ**

Перевод с английского
В. А. УГАРОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1972

Книга известного английского ученого Г. Бонди посвящена краткому изложению идей специальной теории относительности, а также эйнштейновской теории тяготения.

Большое внимание автор уделяет методологическим вопросам создания и развития физической теории и решающей роли эксперимента, практики в развитии научного мышления.

Книга рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся теорией относительности, прежде всего школьников старших классов, а также преподавателей средней школы.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

2-6-3, 2-3-3
102-72

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Если вы интересуетесь современной физикой, если вы хотите познакомиться с сутью специальной теории относительности, если вы хотите узнать, что такое общая теория относительности, наконец, если вам предстоит подготовиться к преподаванию специальной теории относительности в средней школе, прочтите эту книгу. Она посвящена в основном специальной теории относительности, хотя начинается с очень интересного очерка, касающегося проблем построения физической теории вообще. И пусть Бонди ничего не говорит о диалектическом материализме — фактически это рассказ в первой главе может служить хорошей иллюстрацией некоторых основных положений диалектического материализма — в частности, решающей роли практики в развитии теоретического мышления и науки вообще.

В следующей главе изложены основные идеи специальной теории относительности. В нашей стране этот предмет стал частью программы физики в средней школе. Приятно читать слова Бонди: «Я всегда повторял, что моя заветная цель — ввести преподавание теории относительности в программу начальной школы» — и думать, что его мечта, тесно связанная с развитием творческих способностей у юношества, осуществлена в нашей стране.

Преподавание специальной теории относительности — это проблема, стоящая и перед педагогической наукой, и перед учителями. В своей книге Бонди предлагает очень изящный подход к специальной теории относительности — так называемый «метод k -коэффициентов». Нельзя сказать, что этот метод является совершенно новым для советского читателя — он мог познакомиться с ним по книге того же Бонди «Относительность и здравый смысл», выпущенной издательством «Мир» в 1967 г., или по более серьезной книге Д. Бома «Специальная теория относительности», изданной тем же издательством в том же году. К сожалению, в обеих книгах метод « k -коэффициентов» изложен довольно трудно и не очень удачно. Быть может, именно поэтому метод « k -коэффициентов» не получил достаточного распространения в нашей литературе и практике преподавания. Однако бесспорным преимуществом этого метода является то, что он позволяет избежать введения координатных систем и в то же время выявляет все основные положения, необходимые для построения специальной теории

относительности. Иначе метод «*k*-коэффициентов» называется «радиолокационным».

В книге Бонди, которую вы держите в руках, метод «*k*-коэффициентов» изложен ясно, просто и красиво. Насколько нам известно, радиолокационный метод изложения специальной теории относительности был предложен самим Бонди.

Но это не единственная удачная находка в этой небольшой по объему книге. Стоит только прочесть, как изложен в ней впамятный «парадокс часов». Об этом парадоксе написано так много и временами так путано! Бонди же сумел на 2—3 страницах сказать все, что нужно.

Конец книги посвящен некоторым вопросам общего характера, связанным с теорией тяготения Эйнштейна. Эта часть книги интересна тем, что автор, в отличие от многих, которые на первый план выдвигают достижения теории, прежде всего подчеркивает ее трудности. Вряд ли можно умалить величие теории Эйнштейна, но для развития науки наибольший интерес представляют именно затруднения и «узкие места» любой теории.

При обсуждении математических деталей теории изложение автора становится заметно сложнее. Заинтересованные читатели могут проследить за развитием излагаемых Бонди идей в книге Р. Пенроуза «Структура пространства-времени», которую выпускает издательство «Мир» в 1972 г. Разумеется, книга Пенроуза рассчитана на более подготовленного читателя.

В виде приложения добавлена популярная статья Бонди «Гравитационные волны». Вопрос о гравитационных волнах буквально за последние годы приобрел захватывающий интерес. Уже сейчас есть много шансов за то, что ученым удастся зарегистрировать гравитационные волны, но полной уверенности, что они обнаружены, пока еще нет. А если она появится, перед астрономией развернутся поразительные перспективы использования гравитационных волн в интересах науки.

Быть может, через десяток лет к разделам астрономии, рожденным в XX веке: радиоастрономии, ультрафиолетовой, инфракрасной, рентгеновской, добавится еще и «гравитационной».

И можно закончить предисловие тем, с чего мы начали, — прочитайте эту книгу. Вы не пожалеете об этом. Остатки лишь добавить, что книга написана легко и увлекательно и читается почти как захватывающий детектив — разумеется, научный.

В. А. Уваров

ПРЕДИСЛОВИЕ

Когда я получил приглашение прочесть Тарнеровские лекции, и подумал, что это дает мне удобный повод для того, чтобы познакомить слушателей со взглядами, сложившимися у меня за последние годы. Ученому не часто доводится рассказать о своих мыслях. Он печатает свои работы и может обсуждать их на различных коллоквиумах и симпозиумах. Но одно из несчастий науки заключено в чрезвычайно стилизованном способе подачи научных работ. Несколько лет назад сэр Питер Мидавор вел первую передачу Би-би-си из серии «Все ли правда в научных статьях?». В конце передачи он дал безусловно отрицательный ответ. Я внутренне согласен с его выводом, потому что форма и стиль, принятые для научных статей, в значительной степени искажают подлинный ход мыслей автора. Читатель научной статьи вряд ли узнает, что именно думал автор и каковы были его цели. Дело в том, что автор чаще всего старается — и я вряд ли ошибусь, если скажу, что больше всего этим грешат представители чистой математики; впрочем физики и химики не многим лучше — представить полученные им результаты так, как будто бы они возникли в результате мгновенного озарения. Автор не дает ни малейшего намека на то, как он подошел к самой постановке задачи. Сформулировав свои результаты, автор приступает к их доказательству посредством логических выводов, строгость которых вынуждает читателя — хочет он того или не хочет — согласиться с автором. Цель подобного изложения совершенно ясна: оставить столь же бесплотный и безличный текст, каким предполагается и его читатель, исходя из того, что всем, кому захочется узнать, в чем же состоит результат автора, поневоле придется в этом разобраться. Научная статья чаще всего ничего не говорит читателю о том, как был получен тот или иной результат. Зачастую решение, излагаемое автором, составляет всего пятую часть того, что ему пришлось обдумать (хотя я не проводил статистического исследования, но думаю, что порядок величины правильный). Что же касается вопроса, почему автор занялся именно этой проблемой, то лишь самые отчаянные авторы позволяют себе сделать едва уловимый намек.

Таким образом, научная статья — это весьма своеобразная форма изложения. У нее есть свои достоинства, прежде всего крат-

кость. Но она превращает науку — с моей точки зрения, самую гуманную из всех областей человеческой деятельности — в нечто совершенно безликое; вот почему для ученых оказываются жизненно необходимым куда-то ехать, чтобы повстречаться друг с другом и поговорить о том, чего они не могут написать в своих статьях. Однако такие поездки всегда затруднительны для молодых людей, у которых мало возможностей путешествовать и встречаться с людьми, живущими на другом краю света: фондов для командировок, легко доступных людям, достигшим известного положения, всегда не хватает для молодых ученых. Я надеюсь, что достаточно полно высказался, чтобы показать, что сопрошенная форма научных статей представляет собой некоторую разновидность смиренной рубашки.

Второй способ дать выход своим идеям состоит в том, чтобы писать книги. Книга — это прекрасная вещь, но, вообще-то говоря, книг ужасно много; в результате читателям нелегко, а авторам, пожалуй, и того хуже. Кроме того, книга обычно, если не всегда, имеет определенную задачу или тему; поэтому книга отнюдь не лучшая возможность для автора, желающего иметь достаточную свободу для своих разрозненных мыслей, приходящих ему на ум по тому или иному поводу. Те лекции, прочесть которые я был приглашен (теперь они публикуются в виде книги), дали мне редкую возможность высказать свои потаенные мысли.

Читатель не должен ожидать от этой книги ни железной связности, ни точных решений четко сформулированных вопросов; он скорее найдет здесь пеструю смесь нерешенных вопросов, моих взглядов на методику обучения и даже еще интимные взгляды на то, что я считаю мифами науки.

1. В ЧЕМ И КАК ОГРАНИЧЕНЫ НАШИ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

Само существование научных теорий указывает нам на один из самых важных (возможно, *самый* важный) аспектов той разновидности мышления, которое мы называем научным; особенности научного мышления были очень ясно сформулированы Поппером*.

Согласно точке зрения Поппера, процесс создания теории состоит главным образом в работе воображения; естественно, что ученый в этом процессе направляется эмпирическими знаниями (полученными в ходе экспериментов и в результате наблюдений), доступными в данный момент. Цель создаваемой теории заключается прежде всего в том, чтобы понять все уже известные факты. Однако сверх этого существенным требованием, предъявляемым к теории, является требование ее «способности вытягивать шею», т. е. делать определенные утверждения, допускающие проверку путем эксперимента или наблюдений.

Очень важным для нас является утверждение Поппера о том, что если один эксперимент или наблюдение *противоречит* теории, то теория должна быть отвергнута. Однако ни при каких обстоятельствах нельзя сказать — даже в том случае, если многие эксперименты и наблюдения *подтверждают* теорию, — что теория является доказанной. Теория проверяется экспериментами и наблюдениями; когда теория выдерживает одну проверку, перед ней сразу же возникает очередная задача — сделать следующее

* К. Поппер — современный английский философ, представитель логического позитивизма. Его взгляды на характер научных высказываний, как доступных опровержению опытом («принцип фальсифицируемости»), сыграли определенную роль в формировании взглядов на развитие науки, распространенных среди западных ученых. Но его отношение к науке двойственно: признавая связь науки с действительностью, он в то же время выступает против концепций, что наука описывает сущность вещей. — *Прим. перев.*

предсказание, и теория вынуждена все время идти вперед по краю пропасти, вытягивая шею все дальше и дальше, так что открываются все новые и новые способы проверки. Доказательств справедливости теории просто не существует в этой картине, которая, как мне представляется, очень верно отражает характер научной деятельности; в описываемой картине важнейшую и определенную роль играют доказательства *неправильности* теории. Можно сказать, что существенным элементом прогресса в науке является доказательство несправедливости той или иной теории. В этом и состоит основное утверждение Поппера, к которому я полностью присоединяюсь.

С другой стороны, к высказанным идеям приходится сделать немало оговорок. Часть из них хорошо известна всем, кто занимается философией науки, кое-что — это мои собственные домыслы. В свое оправдание я могу сказать, что если в последующем изложении вы обнаружите не слишком глубокую философию науки, то я напомню вам, что я совсем не философ, а физик. Но если вам по нравится и то, как я говорю о физике, то тут самое время напомнить, что я числюсь по кафедре математики.

Прежде всего я хотел бы обратить внимание на два или три обстоятельства. Наши чувства справедливости и непредвзятости встают против теории, которая многократно проверялась и перепроверялась, а в один прекрасный день все же оказалась несостоятельной и была отвергнута. В конце концов, во что же превращается такая теория? Может быть, ее выбрасывают на свалку и забывают о ней? Однако я убежден, что здесь следует быть очень осмотрительным и осторожным. Если теория прошла достаточно серьезную проверку, мы можем быть уверены в том, что существует некоторая область знания — эмпирического знания, — которая вполне адекватно описывается этой теорией. Верно, конечно, что усовершенствованию техники измерений или распространению исследований на более широкую область может выявить несостоятельность теории. Но это вовсе не означает, что теория несправедлива и бесполезна для того круга явлений, в котором она зародилась.

Когда архитектор составляет проект здания, то, как и в Древнем Египте, он исходит из предположения, что Земля плоская. Представление о плоской Земле было катего-

рически отвергнуто, но тем не менее техника строительства на достаточно ограниченной площади вполне может опираться на предположение о плоской Земле. Вся разница между тем временем, когда еще не было опровергнуто представление, что Земля плоская, и нашими днями состоит лишь в том, что теперь можно сказать: это правильный способ рассуждения для того, чтобы строить здания. Раньше можно было бы добавить: «То, что Земля плоская, — это истина». Не прекращаются споры о том (я никогда не понимал этих споров и не участвовал в них), имеет ли вообще какое-либо отношение к науке слово «истина». Сам я склоняюсь к тому, что наука никогда не имеет дело с истиной*, однако я не чувствую себя достаточно сведущим, чтобы пускаться в развернутую дискуссию по этому поводу. Во всяком случае, когда было опровергнуто представление о плоской Земле, вместе с ним был изменен общий подход к вопросу. Но это вовсе не уменьшило практическую пользу применения надежно проверенных методов строительства на ограниченных площадях.

В менее юмористическом плане можно рассмотреть пример ньютоновской теории тяготения. Вряд ли я ошибусь, если скажу, что ни одна физическая теория не подвергалась таким испытаниям, проверкам и перепроверкам, причем с почти непостижимой степенью точности, как теория тяготения Ньютона за первые два с четвертью века ее существования. Но все эти многочисленные проверки не могли уберечь теорию от того, что она в конце концов оказалась опровергнутой. Несостоятельность теории была выяснена только тогда, когда примерно двести лет спустя после ее появления удалось произвести чрезвычайно точные и тонкие измерения. Реально несостоятельность теории тяготения Ньютона означает лишь то, что мы не можем ожидать от этой теории исчерпывающего описания поведения сил тяготения во всех случаях. Но мы узнали с полной достоверностью после грандиозной серии прове-

* Если бы автор сказал «с абсолютной истиной», его мысль была бы совершенно точной. Действительно, как учит диалектический материализм, мы всегда имеем дело с относительными истинами (из которых складывается объективное знание). — *Прим. перев.*

рок, что если нам нужно знать результаты, к которым приводит любая теория тяготения в точно известных и строго установленных пределах точности, то было бы просто сумасшествием применять какую-либо более сложную теорию тяготения, чем ньютоновская. И лишь тогда, когда мы переходим к некоторым особенно тонким вопросам или хотим иметь более глубокий анализ и углубленное объяснение явлений, нам приходится отказаться от ньютоновской теории. Мы отказываемся от теории Ньютона, отчетливо понимая, почему мы так поступаем: эта теория не совсем соответствует данным наблюдений. Мы вполне сознательно оставляем ньютоновскую теорию и куда менее уверенно переходим к другой.

Следующий вопрос, который мне хотелось бы обсудить, является скорее вопросом о взглядах на развитие техники и науки. Я уже говорил о ниспровержении существующих теорий как важном факторе прогресса в науке. Но почему мы можем сегодня ниспровергнуть то, что не могли затронуть раньше? Ответ состоит в том, что сегодня мы можем провести более точные эксперименты, чем вчера, потому что техника шагает вперед. Следовательно, прогресс техники является абсолютно необходимым условием для прогресса науки. Удивительная болезнь нашей страны [Англии. — *Ред.*], как мне кажется, состоит в том, что наука ушла вперед, оставив далеко позади себя слабую, плохо развитую технику. Однако взаимоотношение науки и техники напоминает взаимоотношения между курицей и яйцом; нельзя иметь одно без другого. Верно, конечно, что современная техника вышла из недр современной науки; но мы не имели бы современной науки без современной техники.

Неудержимый поток открытий, хлынувший в конце XIX в., позволил нам заглянуть в глубь вещества: были открыты электроны, рентгеновские лучи; мы научились работать с радиоактивными элементами. Однако все это стало возможным благодаря тому, что развитие техники позволило создать хорошие вакуумные насосы; до тех пор, пока не существовало вакуумных насосов, ни одно из перечисленных исследований просто нельзя было бы сделать. Слов нет, открытие рентгеновских лучей — блестящее научное открытие, но лишь тогда, когда в руках инженеров.

рентгеновские установки стали надежным, безопасным и точным оборудованием, открылась возможность научного использования этого открытия. Именно тогда был достигнут существенный прогресс в молекулярной биологии.

Я уже отмечал, что этот пункт является вопросом о связи науки и техники. В Англии глубоко укоренился предвзвешенный, отводящий технике второстепенную роль. Однако на самом деле техника в такой же степени определяет развитие науки, в какой наука обуславливает развитие техники.

Теперь я вернусь к сделанному ранее замечанию, что нам приходится отказываться от теории тяготения Ньютона не только в том случае, когда мы занимаемся вопросами тяготения, располагая возможностью поставить очень точные измерения, но и тогда, когда нам желательно углубить понимание всего явления в целом. Я убежден, что вопрос о глубине понимания чрезвычайно важен, но вместе с тем мне самому он до конца не ясен. Конечно, представление о глубине различно в применении к различным объектам; люди, занимающиеся чистой математикой, имеют по этому поводу весьма четкое и категоричное мнение. Впрочем, я боюсь излагать здесь их взгляды по той простой причине, что не считаю себя достаточно компетентным в математике. Однако в физике, как мне кажется, понятие глубины вполне разумно.

Прежде всего мы должны рассматривать нечто как достаточно глубокое в том и только в том случае, если это нечто обладает достаточной универсальностью. Универсальность в науке — это довольно странная вещь. Поквала биштексу, который мне подали на завтрак, — это совсем не научное утверждение. Может быть, это очень существенно для повара, но никак не для физика. Причина состоит в том, что все относимое к науке должно быть воспроизводимо и в случае необходимости может быть проверено кем-то другим в любом ином месте. Однако насколько далеко мы можем продвинуться в этом направлении? Проверки, испытания при одинаковых условиях безусловно присущи научным методам. Однако насколько далеко можно распространить предположение, согласно которому все, что можно рассматривать с научной точки зрения, должно быть обязательно воспроизводимо?

Этот вопрос приобретает крайний интерес в одной области, хотя я должен оговориться, что, возможно, здесь у меня имеются профессиональные предубеждения. Речь идет о воспроизводимости в космологии. Если нечто зависит от абсолютного, универсального времени — например, если вы считаете, что у Вселенной есть определенный возраст, — то, разумеется, это фундаментальное универсальное время должно как-то входить в ваши уравнения. Но испытание теории, т. е. проверочные эксперименты, всегда будет осуществляться позже, чем исходный эксперимент. Отсюда следует, что интересующая нас переменная невоспроизводима: этой переменной никогда нельзя придать то значение, какое она имела когда-то. Мы очень далеки от того, чтобы поставить эксперимент, в котором бы обнаруживался подобный эффект.

Правда, в некоторых космологических теориях предполагается, что такая фундаментальная величина, как постоянная тяготения, монотонно меняется с абсолютным, универсальным временем. С этой точки зрения не может быть и речи о строгой воспроизводимости. Как и до какой степени это обстоятельство исключает возможность научного подхода к такого рода проблеме — это вопрос весьма дискуссионный. Пожалуй, чуть ли не каждый из высказывавшихся по этому вопросу имел свою собственную точку зрения. Более того, многие из нас (и я сам должен в этом покаяться) при разных обстоятельствах держались далеко не одинаковой точки зрения. Подводя итог, я хочу подчеркнуть, что универсальность, которая желательна для любого вида фундаментального знания, иногда может быть достигнута совсем не таким простым путем. И все же я склоняюсь к мнению, что мы должны рассматривать теорию как достаточно глубокую лишь в том случае, если она обладает достаточной универсальностью.

Встав на точку зрения астронома, я могу, продолжая эту мысль, заявить, что любая теория, в которую входят некоторые параметры, связанные, скажем, с особенностью атмосферы, не может быть сколько-нибудь глубокой. Дело в том, что в любом другом месте, кроме Земли, нельзя ожидать такого же состава атмосферы, тех чисто географических препятствий на пути ее движений, таких же источников энергии и т. д. С другой стороны, атомная фи-

зика с самого начала окружена ореолом глубины, как и все относящееся к элементарным частицам, потому что у нас есть веские причины верить в то, что атомы в *любом месте* и в *любое время* ничем не отличаются от атомов, которые *сейчас* находятся *здесь*. Следовательно, все, что мы устанавливаем *здесь* и *теперь*, по большей части имеет универсальное значение, а следовательно и глубину.

Обращаясь снова к Ньютону, можно сказать, что закон тяготения — который очень часто называют *законом всемирного тяготения* (подчеркивая тем самым, что этот закон считается справедливым повсюду и всегда, независимо от каких-либо обстоятельств), — это очень глубокий закон. Указанное обстоятельство подтвердилось в связи с одним весьма рискованным умонастроением (по крайней мере мне этот ход мысли представляется брожением умов).

Было сделано немало попыток, в особенности за последние пятьдесят лет (по-видимому, такие попытки предпринимались и раньше), добраться до «окончательных», последних уравнений, прийти к наиболее законченным, абсолютно исчерпывающим формулировкам, к теории, охватывающей все, что мы знаем; но такая тенденция к поискам глубины кажется мне крайне рискованной. Я называю ее рискованной не только потому, что на этом пути не было получено никаких результатов, но также и потому, что сам отношусь к этой идее резко отрицательно. Мои возражения возникли не сегодня, я высказывал их даже в те дни, когда любой уважающий себя специалист по общей теории относительности был занят поисками уравнения, в котором были бы объединены все известные в природе силы. Я думаю, что никогда не следует забывать двух обстоятельств, касающихся науки.

Об одном я уже упоминал; речь идет о прогрессивном характере науки. Мы знаем по своему опыту, что каждый раз, как только наша экспериментальная техника делает шаг вперед, мы обнаруживаем совершенно неожиданные явления, которые до этого не возникали даже в нашем воображении. Я не вижу никаких причин для того, чтобы будущий прогресс экспериментальной техники не приводил к таким же результатам. Но если теория в каком-то смысле открыта (т. е. не замкнута), то она может дать объясне-

ние новым открытиям (по крайней мере, некоторым) и сохранит свое значение даже после того, как будут открыты новые явления. Таковы, несомненно, многие существующие теории.

Чтобы пояснить, что я имею в виду под выражением «теория открыта», я остановлюсь на втором законе Ньютона: скорость изменения импульса тела равна приложенной силе. Само по себе это утверждение вполне строгое и точное, но оно оставляет полную свободу принять за силу любую силу, какая известна или какая, возможно, будет обнаружена лишь в будущем. И если новая сила действительно будет открыта, то нет никаких причин не вводить ее во второй закон. В теории уже заготовлено место, куда можно ввести нечто новое и даже неожиданное. Это вовсе не означает, что теория всегда будет верной; мы хорошо знаем, что ньютоновская динамика перекрывается релятивистской динамикой. Из того, что теория может оказаться неправильной, вовсе не следует, что эта теория не может нам ничего дать; любая теория, которую удастся опровергнуть, нам все же что-то дает. И тем не менее такая теория не является замкнутой. Более того, я считаю совершенно необходимым, чтобы в любой теории оставалось место для того, чтобы в нее могли войти новые, неизвестные до поры до времени факты.

Мы очень напоминаем тех людей, у которых мышление работает патологически и которые на любой вопрос отвечают примерно так: «К сожалению, у меня нет определенного мнения по этому поводу, я не располагаю всеми данными, относящимися к этому вопросу». Но ведь ученый именно тот человек, который *никогда* не будет обладать *всеми* фактами, потому что нечто новое может неожиданно вынырнуть в любой момент. Надо быть всегда готовым к столкновению с неизвестным.

Характерной особенностью науки является то, что вы должны иметь возможность описывать явления так, чтобы можно было сказать нечто вразумительное, не имея исчерпывающих данных. Мне пришлось слышать — правда, я не знаю, достоверно это или просто чья-то выдумка, — о том, что когда Ньютон впервые стал заниматься проблемой притяжения Луны Землей, его противники говорили: смешно пытаться создавать теорию притяжения Луны

Землей, когда о внутреннем строении Земли почти ничего не известно. Нельзя назвать такую точку зрения неразумной. Но пробным камнем науки является вовсе не то, разумны вы или нет, — много ли осталось бы от физики, если принять за основу такой критерий? Решающим обстоятельством является ответ на вопрос: работает теория или нет? И главным достоинством теории тяготения Ньютона является то, что она работает, т. е. дает правильные ответы на интересующие нас вопросы: в частности, вы можете сказать кое-что о движении Луны, имея весьма смутное представление о строении Земли.

Но не следует думать, что противниками Ньютона были просто глупые люди; в том, что они говорили, есть доля истины. Так, например, нельзя объяснить «вековое ускорение» Луны, которое связано с приливным трением на Земле (а это явление, как выяснилось, обусловлено главным образом приливами в твердой Земле), без знания упругих свойств вещества, образующего Землю. Значит, вообще говоря, *верно*, что нельзя сказать абсолютно все о движении Луны до тех пор, пока вы не знаете достаточно подробно строение Земли. Но особенностью науки является то, что вы можете высказывать утверждения, позволяющие выявить самые существенные черты движения Луны, не зная многих существенных деталей, касающихся строения Земли. Наука изобилует утверждениями, которые выглядят просто как хорошая мина при весьма плохом знании. В этом случае мы говорим: несомненно, мы знаем до смешного мало об этом, но все же мы можем получить надежные и полезные выводы.

Подводя итоги, я резюмировал бы свою точку зрения так: любая теория, претендующая объять *все*, должна немедленно погибнуть. Такая теория окажется бесполезно жесткой, потому что в ней не найдется места для новых открытий, у нее не будет простора для введения чего-то нового. Конечно, новые открытия всегда могут выявить несостоятельность теории и полностью вывести ее из употребления, но мы по крайней мере должны так строить свои теории, чтобы новые открытия оставляли в неприкосновенности *хотя бы некоторые* существующие теории. Именно поэтому большинство наших теорий должны быть *открытыми*.

Та ересь, на которую я сейчас так горячо нападаю, была куда более популярна лет тридцать назад. Тогда Эддингтон и Милл предлагали теории, которые, как им казалось, были всеобъемлющими. Но и в наше время такой выдающийся физик, как Гейзенберг, пытается найти «мировое уравнение», в котором, как он надеется, будет заключаться *все*. Слов нет, можно много сказать против такого подхода. Например, можно сказать, что уравнение, которое говорит обо всем, по существу не в состоянии сказать ни о чем, потому что, если бесконечное множество явлений, с которыми мы сталкиваемся в нашем на редкость разнообразном мире, описывается одним уравнением, то путь к пониманию конкретных явлений при помощи этого уравнения окажется длинным, а польза от такого уравнения — сомнительной.

В определенной степени эта критика относится ко всем фундаментальным работам. Я хочу, чтобы меня правильно поняли. Я вовсе не склонен предавать анафеме на корню все поиски глубины в теориях; я очень далек от этого. Любой теории необходима известная глубина, но в разумных пределах; в частности, не нужно пытаться целиком ликвидировать некоторую незамкнутость теории, для того чтобы ее можно было по мере надобности приспособить к новым фактам. В других же отношениях теория должна быть жесткой, потому что теория, недостаточно жесткая для того, чтобы быть опровергнутой, представляет собой всего лишь жалкую игру в слова. (Теория является научной постольку, поскольку она может быть опровергнута.) Но в тот самый момент, когда вы пытаетесь охватить сразу все мироздание, вероятность того, что от вас это «все» ускользнет, возрастает до единицы.

Конечно, все это не очень сочувственная интерпретация деятельности таких ученых, как Эддингтон, Милл и Гейзенберг. Эддингтон, в частности, любил повторять, что если мы будем буквально следовать велению нашего разума и подчиняться структуре нашего мышления, то мы неизбежно раскроем всю физическую картину мира. По существу его мысль сводилась к тому, что эпистемология* —

* Эпистемология — наука о познании.

единственный инструмент для открытия новых физических законов. К счастью, в наше время, по-видимому, казалось совсем немного поклонников этой точки зрения. Но, отвергая эту точку зрения в целом, мы выплескиваем вместе с ней одно очень существенное обстоятельство.

Я, конечно, не психолог, однако у меня сложилось убеждение, что выяснение структуры нашего мышления — дело бесполезное, потому что наши умственные способности определяются прежде всего гибкостью и приспособляемостью нашего мышления. Фактически оно может быть приспособлено ко всему тому, что делает его полезным. С другой стороны, нам не следует забывать о том, когда и как формируется наше мышление. Оно формируется в значительной мере в самые первые годы нашей жизни в результате знакомства с различными вещами во время детских игр. Мы познаем изрядный курс физики за первые два-три года нашего детства. Мы познаем этот курс физики значительно острее и запоминаем гораздо крепче, чем что-либо другое, о чем мы узнаем позже. Мне представляется, что те чрезвычайно важные аспекты физики, которые открываются нам в первые годы нашей жизни, могут включать в себе значительно больше информации, чем это принято думать.

Очень часто мы получаем новые результаты и приходим к более глубокому пониманию явлений, поставив весьма сложные эксперименты. Только значительно позже выясняется, что то же самое можно было бы выяснить куда более простым способом. В конце концов «решающие» эксперименты становятся возможным проводить даже в школе. Однако мне кажется, что мы прилагаем очень мало усилий для использования этого обстоятельства. Не исключено, что изрядная часть физики, изучаемой в высших учебных заведениях, неявно уже содержится в той примитивной физике, с которой мы знакомимся в первые три года нашего существования. Я думаю, что можно с успехом вывести атомную и квантовую структуру вещества из того очевидного факта, что существуют твердые тела. (Сколько-нибудь строгая разработка этой идеи мне не встречалась, но было бы действительно полезно показать, что значительная часть физики «высшей школы», выводи-

мой обычно из довольно тонких наблюдений, по существу уже заключена в общеизвестных истинах.

Возможно, стоит присмотреться к попытке Эддингтона заглянуть подалее в физику с эпистомологической точки зрения, но совсем не в его смысле. Речь идет не о том, что существенная часть «глубокой» физики может таяться в особенностях нашего мышления, а о том, что вошло в наше мышление и сформировало его на ранней стадии нашего развития сравнительно примитивным путем. Не исключено, что эти сведения можно с успехом использовать в дальнейшем. Но в этом направлении сделано пока очень мало.

Я всегда интересовался тем, как сделать специальную теорию относительности доступнее для понимания; я всегда повторял, что моя заветная цель — ввести преподавание специальной теории относительности в программу начальной школы. Что следует сделать для того, чтобы преподавание специальной теории относительности в школе стало возможным, представляется мне совершенно ясным. Если кому-либо удастся изобрести дешевую и безопасную игрушку, представляющую собой достаточно эффективный ускоритель, такую, что с ней будут с удовольствием играть дети пяти-шести или семи лет, — тогда специальную теорию относительности будут рассматривать очевидно как необходимый и вполне подходящий предмет для учебного плана начальной школы. Я уверен, что человек, сумевший показать с помощью батарейки от фонаря то, что раньше требовало применения гигантских ускорителей, — это безусловно великий физик. Физика такого рода, по моему мнению, нуждается в большей поддержке и требует приложения больших усилий.

Мне хочется завершить эту главу несколькими замечаниями о том, почему наши теории всегда *ограничены* — и не только условием утверждать что-то, объясняя далеко не все, но и *исторически*. Я убежден, что при развитии физики все крупные достижения приносили с собой предрассудки и мифы, которые оказывались иногда весьма полезными, а иногда были чрезвычайно вредными для дальнейшего прогресса физики.

Мой любимый пример по этому поводу — максвелловская теория электромагнетизма, фантастически очарова-

тельная, простая, всеобъемлющая теория, которая ознаменовала один из крупнейших успехов в физике, достигнутых около века назад. Однако эта теория увлекла за собой немалый балласт, и некоторая часть этого балласта сделала — и, пожалуй, продолжает делать — работу в других областях физики несколько более затруднительной, чем при отсутствии теории Максвелла. Дело в том, что Максвелл, следуя идеям Фарадея, построил теорию электромагнитных явлений как теорию поля. С тех пор в физике бытует миф о том, что *все* добропорядочные теории должны быть полевыми теориями. Я вовсе не хочу сказать, что полевые теории плохи или вредны или еще нечто в том же духе. Я хочу подчеркнуть другое. Мы оказались неспособны — и на достаточно длительный срок — серьезно рассматривать теории нового типа. Я считаю значительным шагом вперед тот факт, что Уилер и Фейнман лет двадцать назад сумели переформулировать теорию Максвелла так, что она приобрела иную, не полевую форму. Их работа помогла науке избавиться еще от одного мифа.

Бывает и так, что мифы возникают потому, что великие умы, имеющие очень своеобразную точку зрения, умеют смотреть далеко вперед. Все остальные вынуждены рассуждать следующим образом: придерживаться точки зрения великого человека — это значит обеспечить успех повсюду и всегда. От этой мысли трудно отделаться. Мне хочется подчеркнуть, сколь любезной по отношению к нам оказалась природа в области электромагнетизма. В частности, следует напомнить об одной невероятной, но счастливой случайности, которая сделала электромагнитную теорию куда более понятной, чем она могла быть в любом другом случае. Речь идет о законе Ома. Экспериментальный факт состоит в том, что многие материалы, используемые нами в повседневной практике, подчиняются до смешного простому правилу, которое никоим образом не следует ни из одного разумного предположения о проводниках.

Реальный смысл закона Ома состоит в следующем: во многих веществах *скорость* носителей заряда пропорциональна действующей силе. Но ведь мы уже со времен Ньютона знаем, что силе пропорционально *ускорение*! Закон Ома дает выражение для диссипации энергии в та-

кой простой форме, которая больше не встречается нигде. (По крайней мере я не встречал ничего похожего.) Если вы вспомните, как сложна гидродинамика, или попытаетесь построить теорию гравитационной диссипации (как это пытался одно время делать я), вы сможете по-настоящему оценить ту невероятно счастливую случайность, благодаря которой у нас в руках оказалась такая простая формула. Согласно этой формуле, величина диссипации энергии не зависит от механизма диссипации, формула дает простую линейную зависимость и приложима к большому числу веществ. Но то же обстоятельство, которое так здорово помогло нам при развитии электромагнитной теории, одновременно развратило нас: мы стали надеяться на такую же простоту повсюду и были разочарованы, когда ее не обнаружили. Так возникают новые ограничения при построении теории: новые теории далеко не всегда могут быть столь же просты, как предшествующие.

2. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ, ЕЕ МИФЫ И ПРЕДРАССУДКИ

Относительность — это такая тема, о которой можно говорить и писать очень долго, потому что, с одной стороны, в ней сосредоточено очень много здравого смысла, а с другой — вокруг нее образовалось поразительное наслоение научно-фантастических романов, чепухи, мифов и, сверх того, всяких мистификаций. У меня сложилось твердое убеждение, что авторы популярных книг первые годы после создания теории относительности не сомневались в одном: чем менее понятна будет их книга, тем большим спросом она будет пользоваться. Такой подход вызвал беспрецедентно обильный поток книг по этой тематике, и каждое последующее творение безусловно превосходило предшествующее. Я заинтересовался вопросами относительности несколько лет назад. Дело было не в сомнениях в кристально ясной специальной теории относительности, которую знают все физики; моя цель состояла в том, чтобы попробовать соскрести все наслоения «загадочности» и просто чепухи с этой теории и выявить те простые и четкие идеи, которые останутся после этой операции.

Позвольте начать с самой идеи относительности. Было бы очень неумно с моей стороны утверждать, что наука должна следовать предписаниям и правилам, одинаковым для всех времен. Вместе с тем я склоняюсь к мысли, что известного рода повторяемость экспериментов, по-видимому, всегда необходима для прогресса науки. Я не стану развивать эту мысль подробнее; достаточно заметить, что в какой бы форме ни реализовалась идея повторяемости, под этим всегда будет подразумеваться независимость от таких частных обстоятельств, как момент времени, положение в пространстве или состояние движения. Очевидно, чем большая степень независимости от самых разнообразных обстоятельств принимается, тем легче построение физики.

Для современной стадии развития науки (под которой я понимаю промежутки времени начиная с Галилея до наших дней) характерна как раз высокая степень независимости. В частности, для той науки, которую можно назвать «лабораторной физикой», принимается независимость явлений от их местоположения в пространстве, независимость от выбора момента времени и также (в несколько ограниченной форме) независимость от состояния движения.

Хотелось бы напомнить, насколько сильно различались взгляды на этот вопрос до Коперника и после него. Поскольку до Коперника считалось, что Земля — это центр Вселенной, то тем самым подразумевалось, что все явления, происходящие на Земле, носят особый характер и, следовательно, совершенно нетипичны для других мест: то, что правильно «здесь», нельзя считать пригодным где-нибудь «там» из-за очень специфических свойств этого самого «здесь», которое было центром всего. Очень лестно для собственного самолюбия думать, что занимаешь абсолютно неповторимое и в высшей степени избранное положение, но такое предположение причиняет ужасные неудобства, когда вы начинаете заниматься наукой. Благодаря трудам Коперника, Галилея и Ньютона мы избавлены от самодовольного и неудобного предположения о том, что все явления на Земле носят исключительный характер. После них мы уже навсегда осознали простую истину, что все происходящее где-то «там» в общем не очень отличается от происходящего «здесь». Мне кажется, что независимость явлений от места, где они происходят, было не так уж трудно осознать даже в то относительно далекое время. Но вот что было по-настоящему трудно понять в работах Галилея и Ньютона — и что довольно трудно понять даже сейчас, — так это ограниченную независимость явлений от состояния движения.

Вообразим философа, абсолютно незнакомого с физикой; такой философ мог бы сказать, что разумное объяснение независимости физических явлений от состояния движения можно было бы дать двумя альтернативными способами. Например, можно предположить, что существует одно избранное, привилегированное состояние движения, которое мы можем назвать покоем, а все остальные состоя-

ния движения принципиально отличаются от него. Подобное утверждение будет вполне ясным и четким. Но можно также считать, что вопрос о состоянии движения вообще не должен возникать в физике. На самом деле мы не сталкиваемся ни с одной из этих альтернатив. Реальная ситуация выглядит очень странно — мы признаем существование множества выделенных состояний движения (а именно всех инерциальных движений), так что можно говорить о равноправии всех наблюдателей, движущихся в произвольных направлениях инерциально, и неравноправии между всеми ними и любыми другими наблюдателями. Со времен Галилея и Ньютона скорости рассматриваются как относительные, а ускорения как абсолютные. Это нелегко понять, и трудно указать простой выход из этой ситуации.

Следует помнить, насколько тесно связана независимость от скорости со всей коперниканской картиной. Первая реакция на теорию Коперника человека «с улицы», спрошенного этак лет 300—350 тому назад, была бы примерно следующей: «Очень глупо предполагать, что Земля движется: ведь никто из нас не ощущает никакого движения». Такой ответ, как первая реакция на точку зрения Коперника, очень показателен. Только благодаря независимости физических явлений от скорости — правда, совместно с рядом других, более тонких вопросов, относящихся к гравитации (впрочем, эти вопросы имеют второстепенное значение), — предложенная Коперником схема может быть сохранена. Так мы подходим к взглядам Галилея и Ньютона: существует избранная группа состояний движения, полностью равноправных по отношению друг к другу, но отнюдь не эквивалентных другим состояниям движения. В относительности нет ничего более трудного для понимания, чем осознание ньютоновской относительности: существует множество инерциальных наблюдателей, каждый из которых ничем не лучше и не хуже остальных; однако для наблюдателя, движущегося с ускорением, дело обстоит совсем иначе.

Я специально останавливаюсь на этом пункте потому, что, по моему мнению, далеко не во всех изложениях теории относительности указывается, что воистину трудный шаг был в свое время сделан Ньютоном и Галилеем и что труд-

ности, которые пришлось преодолеть Эйнштейну, были значительно меньше. Бытующее обратное представление связано с тем, что мы изучаем ньютоновскую физику в том возрасте, когда сила нашего восприятия чрезвычайно велика, а возможности критической оценки еще незначительны. Мы легко проглатываем эти очень трудные идеи без особых размышлений и в конце концов приходим к убеждению, что корень всех трудностей кроется в тех вещах, которые мы начинаем изучать позже, когда сила нашего восприятия уже оскудела, а критические возможности лишь слегка возросли. Мы обнаруживаем трудности в эйнштейновской картине мира только потому, что не смогли достаточно ясно ощутить их в ньютоновской картине мира. Эйнштейн просто вернул нас снова к Ньютону. Ведь, в конце концов, в динамике Ньютона — и, в частности, в первом законе Ньютона — уже четко сформулировано выделение движения по инерции среди всех остальных движений. Прямым логическим следствием из первого закона Ньютона является утверждение, что все инерциальные наблюдатели равноправны — в той степени, в какой справедлив первый закон Ньютона. Согласно вполне правдоподобному умозаключению, равноправие наблюдателей распространяется на все другие законы движения и, следовательно, на всю механику.

Но совсем не обязательно ограничивать равноправие инерциальных наблюдателей только законами механики. Подобное ограничение было введено в XIX в. в качестве добавки к той картине мира, которая рисовалась в то время; эта добавка возникла в связи с широко распространенными тогда взглядами на механизм распространения света. К сожалению, у нас еще свято соблюдается традиция учить людей релятивистским идеям, начиная с тщательного и планомерного ознакомления их с воззрениями XIX в. С точки же зрения науки XIX в. в той части физики, которая касается света, никакого равноправия между инерциальными наблюдателями нет, поскольку, согласно господствующей точке зрения, скорость света отсчитывается относительно эфира. И вот после того, как мы не без успеха изложили людям представления XIX в., мы неожиданно заявляем: «Впрочем, это все неправда». Я не вижу никаких разумных причин, оправдывающих такие стран-

ные маневры. Если начать просто с ньютоновской динамики, то представление о равноправии всех инерциальных наблюдателей вытекает оттуда непосредственно, наряду с тем фактом, что относительная скорость двух инерциальных наблюдателей не должна меняться со временем. Это и есть ньютоновский принцип относительности. Роковой шаг на этом этапе лежит в некритическом подходе к понятию абсолютного времени. Абсолютное время не входит явно как органическая часть в ньютоновские законы движения, хотя, конечно, оно прямо связано с общими представлениями Ньютона. Если бы мы на этом этапе говорили: «Допустим на время существование абсолютного времени, но не будем забывать о том, что мы его просто дополнительно ввели наряду с первым законом Ньютона», тогда у нас не возникало бы ни малейших затруднений впоследствии, при переходе к специальной теории относительности.

С этой точки зрения все, что сделал Эйнштейн, сводится к следующему. Эйнштейн сказал: «Из первого закона Ньютона с неумолимой логикой вытекает, что существует множество наблюдателей (называемых инерциальными наблюдателями), каждый из которых обнаруживает для себя справедливость первого закона Ньютона; все остальные наблюдатели должны будут признать, что первый закон Ньютона неверен; кроме того, относительная скорость любых двух инерциальных наблюдателей не меняется со временем». Очевидным обратным следствием этого утверждения является утверждение о равноправии всех инерциальных наблюдателей в тех случаях, в которых справедлив первый закон Ньютона, потому что именно этот закон позволяет нам выделить инерциальных наблюдателей среди всех остальных. В динамике Ньютона делается еще один шаг, чтобы расширить это равноправие, распространив его на *все механические* явления. Эйнштейн же распространил это равноправие на *все явления* вообще.

Итак, мы подошли к ньютоновскому пониманию принципа относительности, исходя из ньютоновских законов; несложные аргументы позволяют заключить, что принцип относительности применим ко всем механическим явлениям. Затем можно занять несколько критическую позицию и сказать, что в природе не существует чисто механиче-

ских явлений, потому что в любом физическом явлении присутствуют элементы из различных «разделов» физики. Даже при соударении двух бильярдных шаров — а этот пример является прототипом всех механических явлений — мы встречаемся с упругими свойствами шаров, которые, как известно, определяются сложными квантовыми электромагнитными силами. Следовательно, никаких чисто механических явлений в природе быть не может. И если ньютоновский принцип относительности не распространить на всю физику, он оказывается лишенным содержания. Ведь он приложим лишь к определенному классу явлений — чисто механическим явлениям, но этот класс оказывается пустым. Если же, с другой стороны, считать, что ньютоновский принцип относительности представляет собой утверждение, в известной степени согласующееся с опытом, то в качестве правдоподобной гипотезы следует выдвинуть предположение о том, что этот принцип распространяется на всю физику. Это предположение и составляет принцип относительности Эйнштейна. Конечно, такое утверждение является чистой гипотезой; как и всякая гипотеза, оно требует экспериментальной проверки.

Случилось так, что принцип относительности Эйнштейна, утверждающий равноправие инерциальных наблюдателей, оказался одним из немногих утверждений физики, следствия из которого могут быть легко проверены путем эксперимента или с помощью наблюдений. Многих сбивает с толку то, что в учебниках отдается незаслуженное предпочтение опыту Майкельсона — Морли. В связи с этим я хотел бы упомянуть курьезный исторический факт: Эйнштейн как-то упомянул, что, когда он писал свою основную работу по специальной теории относительности (1905 г.), он ничего не слышал об этом опыте*. Уже значительно позже, когда сочли полезным воспроизвести различные работы, по теории относительности, издатели решили (по чьему-то совету) начать с *середины* одной из статей Лоренца**, в таком виде статья начиналась с опи-

сания опыта Майкельсона — Морли. Тон был задан, и с тех пор каждый или почти каждый считал своим долгом начинать именно так.

Но до чего же это неудачное начало! Ведь прежде всего вам нужно изложить основные идеи физики XIX в., ибо именно из этих идей выросло настоящее желание поставить тот эксперимент, какой осуществили Майкельсон и Морли. Затем вы должны сказать, что результат, который все ждали, получить не удалось: следовательно, в том, чему нас только что учили, есть что-то ошибочное. Вдобавок в изложение включается изрядная доза описаний громоздкой и сложной экспериментальной техники паряду с мимолетными упоминаниями о сомнениях, которые время от времени возникали по поводу этих экспериментов. Вся эта процедура мало содействует пониманию теории относительности. На самом же деле следует поступать проще: начать с *принципа относительности* Эйнштейна и попытаться получить из него результаты, допускающие непосредственную проверку. Это оказывается не очень сложным. А тогда можно двигаться дальше.

Еще одним сбивающим с толку обстоятельством является неуклюжий подход к измерению расстояний. Меня беспокоит (хотя я не уверен, что мое беспокойство разделяют и мои коллеги), что очень часто в книгах, посвященных специальной теории относительности, говорится о *жестких линейках*. Но поскольку именно из теории относительности следует, что скорость звука не может превышать скорость света, а в абсолютно жесткой линейке скорость звука была бы бесконечной (в то время как скорость света конечна), мы сталкиваемся с явным противоречием. Именно это противоречие не дает мне покоя. Мне представляется, что нет никакой необходимости вводить такой инструмент, как жесткая линейка. Все, что нам действительно необходимо, — это набор совершенно идентичных часов, которые любезно предоставила нам сама природа. Мы знаем, что частоты колебаний тождественных атомов — точнее, частоты, соответствующие спектральным линиям таких атомов, — всегда одни и те же. Известно, что, наблюдая определенные предосторожности (например, тщательно разделяя изотопы и т. д.), можно подобрать тождественные атомы в том смысле, что эти атомы неразличимы. Это чрез-

* См., например, Р. Шенкленд, Беседы с Альбертом Эйнштейном, Успехи физических наук, 87, 71 (1965); Успехи физических наук, 102, 657 (1970). — Прим. перев.

** «Принцип относительности», Сборник работ классиков релятивизма, ОНТИ, 1935. — Прим. перев.

вычайно удобно, потому что в наших руках оказываются простые (простые в принципе) устройства для отсчета времени, не вступающие ни в одном пункте в противоречие с требованиями относительности.

Что мы делаем, когда измеряем расстояния? Здесь надо отдать должное Милну, который лет сорок назад в своей работе по космологии предложил определять расстояния методом радиолокации. Я сказал бы, что в каждом способном физике сидит талантливый инженер. Вряд ли это обстоятельство когда-либо проявилось столь ярко, как в том случае, когда Милн выдвинул идею радиолокации. Его идея сводилась к тому, чтобы измерять расстояния путем измерения времени. Не стоит скрывать, что Милн столкнулся с некоторыми трудностями в связи с определением расстояний. Если применять радиолокационные методы в космических масштабах, то нам пришлось бы набраться терпения и ждать возвращения посланных сигналов в течение нескольких сот миллионов лет. Но в настоящее время лучшие данные о расстоянии до Луны и о размерах солнечной системы получены с помощью радиолокации. Следовательно, радиолокационный метод измерения расстояний не только прост с принципиальной точки зрения и хорош не только потому, что для его применения достаточно часов (и совсем не нужны жесткие стержни); помимо всего прочего, он уже давно стал привычным методом определения расстояний.

Но радиолокационные измерения решающим образом зависят от некоторых свойств света, и самое важное из них может быть сформулировано, минуя всякие ссылки на метрику*: *в пустом пространстве свет никогда не может обогнать свет*. Иными словами, в вакууме свет всегда имеет одну и ту же скорость, причем эта скорость не зависит от длины волны света, его интенсивности и скорости источника. Конечно, это только гипотеза; мы никогда не сможем сделать более сильного утверждения, сказав, что сформулированный вывод является прямым следствием эксперимента. Однако эта гипотеза выдержала изрядное число серьезных проверок. Одна из таких проверок — на-

* Под метрикой автор понимает способ введения расстояний между точками пространства. — *Прим. перев.*

блюдение света, испускаемого так называемыми спектрально-двойными звездами*. Максимальное смещение спектральных линий в красную сторону у одной звезды наблюдается одновременно с максимальным смещением в фиолетовую сторону у другой. Отсюда следует, что, несмотря на различие скоростей источников света, скорость распространения света, испущенного обоими источниками, одна и та же.

Конечно, в физике всегда возможно объяснить любой экспериментальный результат таким путем, какой нам больше нравится. Однако для этого приходится вводить довольно сложные гипотезы. Несомненно, простейший способ интерпретации наблюдений двойных звезд состоит в том, чтобы считать результаты этих наблюдений подтверждением гипотезы, что в вакууме свет никогда не может обогнать свет. На этой основе можно продвинуться дальше. Измерение расстояний с помощью радиолокации становится однозначным, и безразлично, какой вид электромагнитного излучения используется при этом. Если вас интересуют два тела, находящиеся в один и тот же момент в одном и том же месте, но движущиеся с резко различными скоростями, вы можете направить на эти тела луч локатора в тот самый момент, когда положения тел совпадают. Свет, рассеянный этими двумя телами, возвратится *одновременно*, потому что независимо от скоростей этих тел свет от них идет с одинаковой скоростью: ведь в пустом пространстве свет не может обогнать свет. Тем самым обнаруживается равенство расстояний до обоих тел, находившихся в одной и той же точке, несмотря на то, что эти тела обладали относительной скоростью.

Самой привлекательной чертой использования радиолокации для определения расстояний является то, что разговоры о величине скорости света теряют тогда всякий смысл. Расстояния измеряются интервалами времени, единицами длины становятся световой год, или световая секунда, или световая микросекунда в зависимости от того,

* Двойственность таких звезд обнаруживается спектральными наблюдениями: ввиду орбитального движения звезд друг относительно друга линии в их спектрах периодически смещаются то к красному, то к фиолетовому концам спектра. — *Прим. перев.*

что нам удобно. Но теперь вообще не встает вопрос о том, чему именно равна скорость света, — она просто *одна и та же*. Конечно, свету нужен год, чтобы пройти расстояние в световой год; если бы свету потребовалось в разных случаях различное время, чтобы покрыть это расстояние, нам не следовало бы называть это расстояние световым годом. Ввиду этого любой способ измерения скорости света по существу является не способом определения численного значения скорости света, а способом сопоставления длины стандартного метра в Париже со световой единицей длины. Вопрос об изменении длины эталона метра — это вопрос физики твердого тела, т. е. той отрасли физики, которая может сказать нам, меняется ли при определенных обстоятельствах длина какого-либо твердого тела, определяемая межатомными силами, или нет. Нас этот вопрос уже не касается; он куда сложнее, чем вопросы теории относительности.

Я пришел к выводу, что среди специалистов-математиков мало известен прием, названный мною «методом коэффициента k ». Напротив, среди неспециалистов этот метод хорошо известен. Сейчас я остановлюсь на нем отчасти потому, что этот метод мне очень нравится, отчасти потому, что многие, познакомясь с этим методом, смогут с его помощью без труда получить все основные следствия из принципа относительности. Вы убедитесь, что этот метод даст вам нужный подход, и обнаружите, что принцип относительности Эйнштейна ведет к разумным выводам, допускающим непосредственную проверку на опыте и с помощью наблюдений. Возрастание массы со скоростью, эквивалентность массы и энергии, замедление времени — все эти явления можно с высокой степенью точности проверить в бесчисленных экспериментах на ускорителях (которые вообще не смогли бы работать, если бы наши формулы, определяющие возрастание массы с увеличением скорости, оказались бы неверными) и многочисленными наблюдениями космических лучей. Именно эти эксперименты служат подлинными опытными основаниями теории, а вовсе не опыт Майкельсона — Морли (и другие опыты той эпохи), который даже в наши дни достаточно сложен для реализации и обеспечения высокой точности.

Так мы получаем в свои руки оружие, пригодное для опровержения еще одного мифа, согласно которому для понимания теории относительности нужно обязательно познакомиться с преобразованиями Лоренца. Разумеется, было бы глупо сказать, что преобразования Лоренца бесполезны. Нет, эти преобразования чрезвычайно полезны. Но все же необходимо четко разграничить тех людей, которые могут понять специальную теорию относительности только в общих чертах, и тех, кто достаточно глубоко знаком с координатными системами, чтобы почувствовать специфические особенности преобразований Лоренца. Было бы на редкость неумно, если бы кто-нибудь специально изучал вопрос о системах координат и их преобразованиях с единственной целью разобраться в смысле преобразований Лоренца. Я не думаю, чтобы такой путь обучения был бы эффективным, и уверен, что это не самый простой путь для изложения специальной теории относительности. Конечно, по существу изложение специальной теории относительности при помощи преобразований Лоренца вполне эквивалентно тому методу, который я называю методом коэффициента k , но, чтобы ощутить эту эквивалентность, приходится подняться на достаточно высокий уровень. Вместе с тем метод коэффициента k позволяет получить наиболее существенные результаты самым простым путем.

Первое весьма заметное упрощение при изложении теории относительности достигается в том случае, когда мы рассматриваем только одну пространственную координату. (Отметим, что так начали поступать уже довольно давно, причем первым это сделал сам Эйнштейн.) Многие характерные черты специальной теории относительности обнаруживаются уже при рассмотрении одной пространственной координаты; к тому же этот частный случай очень удобен и весьма нагляден. Сам я занимаюсь общей теорией относительности, в которой рассматриваются искривленные четырехмерные пространства. Очень часто люди, далекие от этих вопросов, спрашивают меня, как я представляю себе такие пространства. Обычно я отвечаю, что математики тем и отличаются от остальных людей, что они отдают себе отчет в способностях человеческого мозга: последний не может исчерпывающим образом охватить мыс-

2. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

ленно три измерения. Поэтому математик создает математический аппарат, который позволяет ему работать с тремя измерениями без необходимости представлять себе эти три измерения. Математический аппарат, созданный для трех измерений, оказывается обычно достаточным для

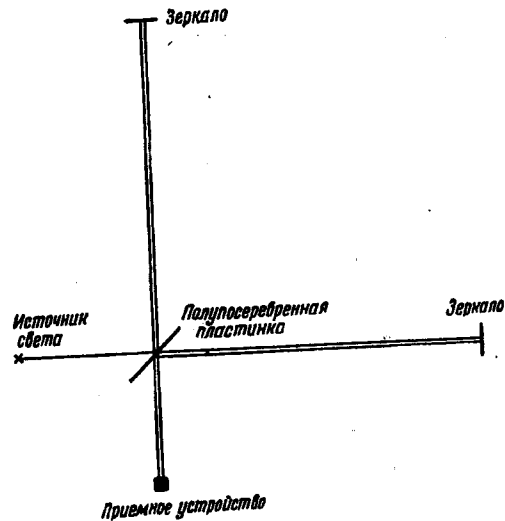


Рис. 1. Схема эксперимента Майкельсона—Морли.

работы и в четырех измерениях и, как и в случае трех измерений, избавляет нас от необходимости воображать четыре измерения.

Развивая свой подход к специальной теории относительности, позвольте мне для начала критически подойти к обычному способу изложения опыта Майкельсона—Морли. Представьте себе, что вы современный физик, которому поручено проверить результат опыта Майкельсона—Морли. Для тех, кто еще не приобрел предвзятого мнения об этом эксперименте, я только укажу, что в ходе его сравнивается скорость света в двух различных направлениях. Пучок света (рис. 1), испускаемого источником, расщепляется с помощью полупрозрачной стеклян-

ной пластинки на два пучка, распространяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Каждый из этих пучков отражается специальным зеркалом обратно к полупрозрачной пластинке, так что в итоге возникает луч света, в котором собран свет обоих пучков. В приемном оптическом устройстве наблюдаются интерференционные полосы. Вы можете сами повернуть все устройство или подождать, когда это устройство повернется вместе с Землей, и выяснить, произойдет ли смещение интерференционных полос. Такое смещение должно иметь место, если скорость света зависит от направления распространения света: различие в скорости света окажет влияние на относительные фазы света, приходящего из двух расщепленных пучков.

Итак, вы современный физик и хотите повторить этот знаменитый опыт. Вы в не меньшей степени, чем ваши предшественники, убеждены в том, что в ходе эксперимента очень существенно выдержать неизменным расстояние до зеркал во время поворота установки. Но для того, чтобы обеспечить это условие, вы можете воспользоваться современными методами, а не воспроизводить лабораторную технику XIX в. Поэтому вы, возможно, не пользуетесь на сталь и бетон, а предпочтете дистанционное измерительное устройство и сервомоторы, чтобы, передвигая зеркала, удерживать их на постоянном расстоянии от полупрозрачной пластинки. Вряд ли стоит сомневаться в том, что для определения расстояний вы воспользуетесь световыми пучками и интерференционными измерениями. Но когда вы решите удерживать зеркала на заданном расстоянии, контролируя их положения тем условием, чтобы интерференционные полосы оставались неподвижными, едва ли потребуется проводить эксперимент, чтобы выяснить, произойдет смещение интерференционных полос или нет. Вообще говоря, здесь есть некоторые тонкие моменты, поскольку в опыте участвуют два различных световых пучка, но и с учетом этих хитростей наш вывод существенно не меняется.

Таким образом, основываясь на современных представлениях и современной технике, приходится сказать, что опыт Майкельсона—Морли—это просто тавтология. Мои слова ни в коей мере не являются критикой Майкельсона

и Морли, потому что их опыт способствовал становлению наших современных физических воззрений. Однако я решительно встаю против тех, кто продолжает опираться в изложении специальной теории относительности на то направление, которое никак не соответствует современному физическому мировоззрению.

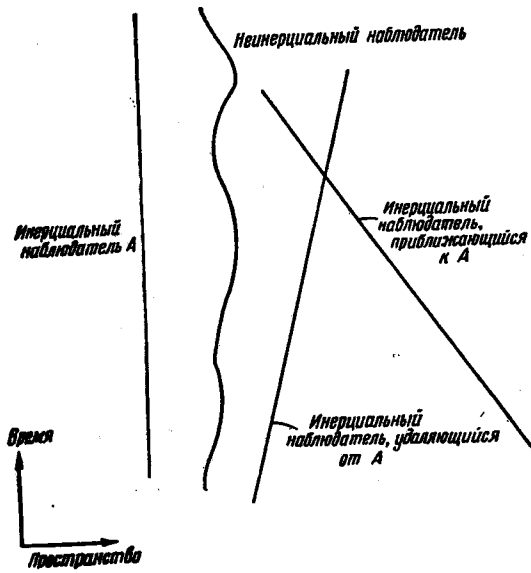


Рис. 2. Диаграмма пространство-время.

После этого затянувшегося введения я готов приступить к выводу следствий из принципа относительности с помощью метода коэффициента k . Основная идея метода — рассмотрение одномерной совокупности инерциальных наблюдателей, т. е. множества наблюдателей, движение которых происходит вдоль некоторой прямой. Соответственно этому можно изображать этих наблюдателей на пространственно-временной диаграмме, используя всего лишь два измерения (рис. 2). По вертикальной оси откладываются в некоторых единицах время, по горизонтальной — расстояние, также в некоторых выбранных единицах. При

этом следует подчеркнуть, что эти диаграммы ни в коей мере не предназначены для того, чтобы с их помощью сделать какие-либо количественные выводы; эти диаграммы имеют лишь указания для запоминания того, где и когда происходит интересующий нас объект.

Наблюдатель A , строящий диаграмму, описывается осью времени, потому что он не перемещается в простран-

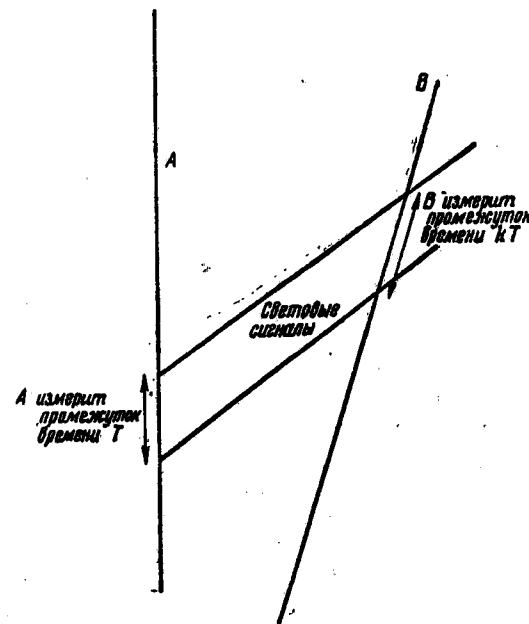


Рис. 3. Коэффициент k .

стве. Любой другой инерциальный наблюдатель B движется относительно A с постоянной скоростью; мы предположим поэтому, что можно описать его некоторой прямой. (Я хочу обратить внимание на то, что число предположений, которые делаются при построении подобных диаграмм, довольно велико, но большинство из них относится к технике построения диаграмм, а не к их содержанию.)

Далее будем считать, что оба инерциальных наблюдателя

имеют при себе «идентичные» часы. Здесь я вынужден целиком опереться на квантовую теорию. (Для самой квантовой теории вовсе не обязательно считать, что идентичные часы существуют.) Благодаря квантовой механике я могу допустить существование идентичных атомов, позволяющих контролировать ход любых часов путем сравнения с собственной частотой (или частотами) атома.

Теперь я собираюсь опереться также на следующее, на первый взгляд не очевидное предположение: допустим (рис. 3), что один из наблюдателей (скажем, наблюдатель A) посылает последовательно два световых сигнала; допустим, что по часам этого наблюдателя промежуток времени между посылкой этих сигналов равен T . Обозначим через kT промежуток времени между моментами получения этих двух сигналов наблюдателем B , причем этот промежуток времени измеряется по часам наблюдателя B . Предположим теперь, что если A и B — инерциальные наблюдатели, то коэффициент k не меняется со временем и не зависит от величины T . Разумеется, это далеко не очевидное предположение, потому что инерциальные наблюдатели выделяются на основании первого закона Ньютона и их определение чисто механическое. Определение такого состояния движения, при котором отношение k , т. е. отношение промежутка времени между приемом сигналов к промежутку времени между их посылкой, является величиной, не зависящей от времени, — это определение совсем иного сорта; его можно назвать геометрическим, или хронометрическим, или как-нибудь еще. Следовательно, я сделал предположение, что инерциальное движение соответствует движению с постоянным значением k . Среди предположений, использованных при построении наших диаграмм, только это последнее связано с существом теории (а не просто с ее графическим представлением); оно обеспечивает эквивалентность двух определений инерциального движения: динамического (выполнение закона инерции) и хронометрического (независимость k от моментов посылки сигналов).

Теперь мы можем воспользоваться принципом относительности. Допустим, что световые импульсы, разделенные промежутками времени T , посылает наблюдатель B (эти промежутки отсчитаны по его часам); наблюдатель A при-

ем эти сигналы, причем промежутки между моментами приема будут равны kT , ибо в силу принципа относительности наблюдатели A и B равноправны. Если бы оказалось, что фактор k не одинаков при посылке световых сигналов в различных ситуациях, то равноправие наблюдателей A и B не было бы соблюдено; тогда можно было бы сказать, что один из них находился «реально» в покое и большей степени, чем другой. Позвольте мне напомнить, что, если бы мы проделали аналогичный опыт со звуком (в этом случае существует среда, в которой распространяется звук, т. е. воздух), фактор k в сильнейшей степени зависел бы не только от относительной скорости источника и наблюдателя, но также и от скорости каждого из них относительно воздуха. Мы получили бы различные факторы k , если в одном случае источник звука покоился, а приемник двигался относительно воздуха, а в другом — приемник покоился относительно воздуха, а источник двигался.

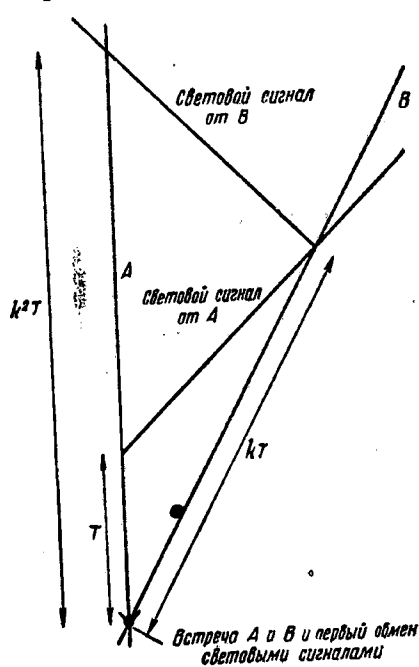
Когда я говорю «покоился», то подразумеваю покой относительно среды, в которой распространяется звук. Все триополнения XIX в. таились именно здесь, потому что тогда все думали, что распространение света очень сходно с распространением звука; по тогдашним представлениям все различие сводилось к тому, что свет и звук распространяются в разных средах. Теперь же мы полностью отвергаем какое-либо сходство, поскольку никакой среды, в которой распространяется свет, не существует. Однако тот факт, что воздух является средой, в которой распространяется звук, физик может наблюдать самыми различными способами.

То обстоятельство, что фактор k одинаков при посылке сигналов от A к B и от B к A , вытекает непосредственно из принципа относительности. Нам больше не придется пользоваться этим принципом где-нибудь еще, но в данном месте его использование является существенно важным и решающим.

Нетрудно видеть, что фактор k характеризует относительную скорость наблюдателей A и B . Эта относительная скорость может быть легко введена в наши рассуждения. Мы опять воспользуемся диаграммой (рис. 4). Допустим, что A и B обмениваются световыми сигналами, когда они

оказываются в одном и том же месте. Поскольку расстояние между ними в этот момент равно нулю, такой обмен сигналами не требует никаких затрат времени.

Через промежуток времени T по своим часам наблюдатель A посылает второй световой сигнал. Этот сигнал будет принят наблюдателем B ; согласно нашим предыдущим рассуждениям, часы наблюдателя B отсчитают время kT от момента получения первого сигнала до момента



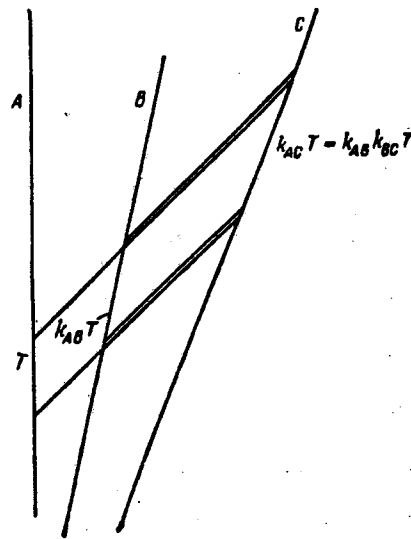
получения второго. Если наблюдатель B , получив второй сигнал от A , немедленно отправит световой сигнал к A , то с момента первого ответного сигнала наблюдателя B по его часам пройдет время kT . Но это означает, что второй сигнал от B будет получен наблюдателем A через промежуток времени $k(kT) = k^2T$ (по часам A) относительно момента первого обмена сигналами, когда оба наблюдателя находились в одной точке. Итак, по часам наблю-

Р и с. 4. Определение относительных скоростей по коэффициенту k .

дателя A второй световой сигнал, совершивший замкнутый путь ABA , завершил этот путь за время $(k^2 - 1)T$. Время распространения света в одном направлении равно половине всего времени, затраченного светом, т. е. $\frac{1}{2}(k^2 - 1)T$, ибо скорость света одинакова при распространении света в обоих направлениях (она просто равна единице).

Таким образом, определяя радиолокационным способом расстояние от A до B в момент отражения сигнала, мы по-

лучим величину $\frac{1}{2}(k^2 - 1)T$. Но какое время должен приписать наблюдатель A тому моменту, когда происходит отступление? (Пожалуйста, обратите внимание на то, что отнюдь на этот вопрос совсем не прост!) Действительно, мы впервые столкнулись со случаем, когда приходится говорить о времени, которое следует приписать событию в точке, удаленной от наблюдателя; это означает, что и часы, по которым производятся отсчеты времени, находятся не в той точке, где произошло интересующее нас событие. Когда мы говорим об измерении времени наблюдателем его собственными часами — это совсем просто. Но теперь мы приписываем время событию в точке B по часам наблюдателя A . Очевидно,



Р и с. 5. Сложение движения скоростей.

поскольку скорость света равна единице при распространении света в обоих направлениях, то время, которое припишет наблюдатель A событию в B , должно быть равно половине промежутка времени между посылкой и приемом светового сигнала. Иными словами, наблюдатель A припишет отражению сигнала момент времени $\frac{1}{2}(k^2 + 1)T$ после того момента, когда положения A и B совпадали. В итоге наблюдатель A обнаружит, что B за время $\frac{1}{2}(k^2 + 1)T$ удалился от него на расстояние $\frac{1}{2}(k^2 - 1)T$. Следовательно, скорость v наблюдателя B определится просто как отношение пройденного расстояния ко времени, за которое было пройдено это расстояние:

$$v = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}. \quad (1)$$

Этой простой формулой и определяется связь между скоростью v и коэффициентом k .

Позвольте мне на двух-трех примерах показать, как просто k -исчисление. Пусть рассматриваются три коллинеарных наблюдателя (рис. 5). Пусть связь между наблюдателями A и B определяется коэффициентом k_{AB} , между наблюдателями B и C — коэффициентом, который мы обозначим через k_{BC} . Чему будет равен коэффициент k при непосредственном переходе от наблюдателя A к наблюдателю C , т. е. k_{AC} ? Снова займемся световыми сигналами, помня, что свет не может перегнать свет. Наблюдатель A посылает два световых сигнала через промежуток времени T по своим часам. Эти сигналы придут к наблюдателю B с интервалом, равным $k_{AB}T$ (по часам B), как это следует из определения коэффициента k . Аналогично наблюдатель C измерит по своим часам интервал между приходом двух световых сигналов от A , равный $k_{AC}T$. Если наблюдатель B посылает световые сигналы к наблюдателю C в те же самые моменты, когда он принимает сигналы от A , тогда свет, посланный B , будет двигаться к C вместе со светом, посланным A (свет не может перегнать свет); следовательно, оба сигнала — идущий от A и идущий от B — достигнут наблюдателя C одновременно. Интервал между отправлением сигналов наблюдателем B равен $k_{AB}T$. Поэтому интервал между приемом этих сигналов наблюдателем в C будет в k_{BC} раз больше, т. е. он будет равен $k_{BC} k_{AB}T$. Но в тот же самый момент наблюдатель C примет и сигналы, идущие от A . Следовательно, $k_{AC} = k_{AB}k_{BC}$. Мы пришли к простому результату: коэффициенты k просто перемножаются. Если выразить коэффициенты k через относительные скорости v_{AB} , v_{BC} , v_{AC} с помощью (1), мы получим знаменитую эйнштейновскую формулу сложения скоростей:

$$v_{AC} = \frac{v_{AB} + v_{BC}}{1 + v_{AB}v_{BC}} \quad (2)$$

Этот результат частично был получен Физо задолго до появления теории относительности путем измерения скорости света в быстро движущейся по трубам жидкости. Таким образом, у нас есть подтверждение теории, которое

можно почерпнуть из работы, выполненной за много лет до появления теории относительности.

Уже полученные результаты позволяют судить о мощи k -исчисления. Но самым главным является вывод, что необходимо полностью отказаться от примитивного представления о едином универсальном времени. Здесь следует вернуться к мысли, что любая величина в физике определяется посредством того способа, который использован для ее измерения. Следовательно, время — это то, что измеряется часами. Нет никаких оснований думать, что все часы независимо от состояния их движения будут показывать одно и то же время. Подумайте сами, мое время — это то, что я измеряю моими часами, другой же наблюдатель, движущийся по-иному, измеряет уже свое время по своим часам. Если мы оба — он и я — движемся инерциально, то в силу принципа относительности мы совершенно равноправны. Его время хорошо подходит для описания регистрируемых им событий, а мое время вполне пригодно для описания наблюдаемых мной явлений. Но различие во временах очень отчетливо обнаруживается в той же процедуре, которая привела нас к соотношению (1) (см. также рис. 4). Мы рассматривали опыт, в котором наблюдатель B отмечает по своим часам время kT между приемом двух сигналов, посланных наблюдателем A ; однако наблюдатель A , используя свои часы, приходит к выводу, что его сигналы придут к B , разделенные интервалом времени $\frac{1}{2}(k^2 + 1)T$.

Но почему же интуитивно мы принимаем, что время повсюду одно и то же? Ведь сейчас подобное представление мы считаем ошибкой нашей интуиции. Из соотношения (2) все становится ясным. Наша интуиция подсказывает нам «очевидное» соотношение

$$v_{AC} = v_{AB} + v_{BC} \quad (2')$$

но этот результат следует из (2) при условии, что произведение $v_{AB} \cdot v_{BC}$ пренебрежимо мало по сравнению с единицей. Вспоминая, что в наших обозначениях величина v есть отношение скорости наших объектов к скорости света, мы сразу понимаем, что в повседневной жизни все v очень малы. Даже скорость реактивного самолета составляет в

наших единицах примерно 10^{-6} ; следовательно, всегда можно использовать (2') вместо (2), если только мы не экспериментируем с частицами очень высокой энергии или если нам не нужна очень высокая точность. Аналогично этому, разрешив равенство (1) относительно k , мы убедимся в том, что в «повседневной жизни» значения k очень мало отличаются от единицы; величины kT и $\frac{1}{2}(k^2+1)T$

в описываемых условиях отличаются друг от друга менее чем на $1/10^{12}$.

Опыт, на котором базируется наша интуиция, слишком ограничен, чтобы продемонстрировать нам многозначность измеряемого времени. Мы можем узнать о многозначности времени только в экспериментах, где мы сталкиваемся с очень высокими скоростями. В случае больших скоростей мы сразу же обнаружим, что нам надлежит пользоваться соотношением (2), а не (2'), и мы должны будем следовать результатам эксперимента, а не своей интуиции, опирающейся на недостаточную основу. Следовательно, теорию относительности можно определить как физику высоких скоростей, значительно превышающих те скорости, с которыми мы имеем дело повседневно.

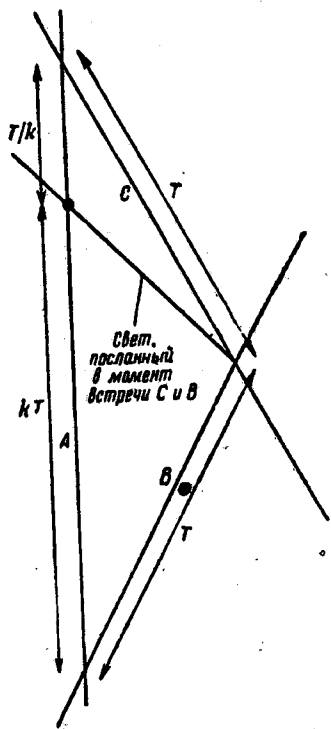


Рис. 6. Парадокс часов.

Теперь обратимся к так называемому парадоксу часов, который поможет нам познакомиться и с другими интересными вещами. Прежде всего мне хотелось бы вывести ряд простых следствий из тех результатов, которые мы уже получили. Вглянем на рис. 5 и предположим, что наблюдатель C покоится относительно наблюдателя A . Тогда $k_{AC}=1$. Этот результат непосред-

ственно вытекает из (1), так как относительная скорость $v=0$, и поэтому $k=1$. Следовательно, в этом случае значение k_{BC} равно обратной величине k_{AB} . Из (2) при $v_{AC}=0$ следует также, что $v_{BC}=-v_{AB}$; это означает всего-навсего, что B приближается к C с такой же скоростью, с какой удаляется от A . Таким образом, та скорость, которая дает при удалении коэффициент k , дает при сближении коэффициент $1/k$.

Теперь мы готовы к тому, чтобы заняться парадоксом часов. Снова рассматриваем трех коллинеарных наблюдателей A , B и C (рис. 6). Пусть скорости наблюдателей B и C относительно A равны по величине, но противоположны по направлению. Поэтому, если для связи A и B следует применять коэффициент k , то для связи A и C — коэффициент $1/k$.

Отсчеты времени делаются следующим образом: первая — при встрече A и B , вторая — при встрече B и C и, наконец, последняя — при встрече C и A . Из симметрии нашей схемы следует, что когда наблюдатель B измеряет интервал времени T между двумя встречами (с A и C соответственно), он должен получить тот же самый результат, что и C , когда последний определяет интервал времени между двумя своими встречами (с B и A соответственно); поэтому этот интервал времени также равен T . Если каждый из наблюдателей B и C пошлет световой сигнал при каждой своей встрече, то наблюдатель A между приемами двух сигналов от B измерит промежуток времени kT , а между приемами двух сигналов от C — промежуток времени $\frac{1}{k}T$. Первый сигнал от B попадает к наблюдателю A при их встрече немедленно: первый сигнал от наблюдателя C придет вместе со вторым сигналом от B . Второй сигнал от C наблюдатель A получит немедленно при встрече наблюдателей A и C . Следовательно, наблюдатель A измерит промежуток времени между первой и второй встречами, равный

$$\left(k + \frac{1}{k}\right) T = (k^2 + 1) \frac{T}{k};$$

совместные же измерения B и C дадут для этого промежутка значения $2T$; оно всегда меньше значения, полученного

наблюдателем A , как это следует из элементарного неравенства*.

Этот результат озадачивает многих, и они недоуменно спрашивают: «Откуда берется такая асимметрия в измерениях при условиях, которые кажутся совершенно симметричными? Вы выбрали вашу систему отсчета так, что у вас покоится наблюдатель A , а наблюдатели B и C движутся. Без сомнения, мы можем поступить и наоборот, считая, что B или C покоятся, а движется наблюдатель A : тогда неравенство изменится на обратное; окажется, что промежуток времени, измеренный наблюдателем A , будет больше, чем промежуток времени, совместно измеренный наблюдателями B и C ?» Но все это рассуждение — чистая бессмыслица. Конечно, я могу провести в точности такие же расчеты, полагая, что наблюдатель B покоится в выбранной мной системе отсчета, а наблюдатели A и C движутся; можно, конечно, подобрать систему отсчета, в которой покоится наблюдатель C , а движутся наблюдатели A и B . Я получу при этом тот же самый результат, который в конце концов зависит исключительно от коэффициента k , а последний не связан с выбором той или иной системы отсчета. (Система отсчета вообще не имеет никакого отношения к моим вычислениям; я использую ее только для наглядности, как это сделано на рис. 6.) Единственное, чего я не могу сделать, так это добиться того, чтобы *одновременно* покоились и B и C в какой-нибудь системе отсчета, потому что B и C обладают относительной скоростью. Таким образом, один временной интервал (самый короткий) всегда получается в результате совместных измерений, произведенных двумя инерциальными наблюдателями. Другой же является результатом измерения *одного* наблюдателя. Следовательно, никакой симметрии в этих измерениях нет; теория относительности никогда не утверждала, что $2=1!$

«Хорошо, — скажете вы, — но не будем пользоваться двумя часами — часами наблюдателей B и C ; давайте попросим наблюдателя B , когда он поравняется с наблюдателем C , перекинуть свои часы наблюдателю C . Наблюда-

* $(k-1)^2 > 0$, откуда $\frac{k^2+1}{k} > 2$. — Прим. перев.

тель C поймает эти часы (или просто примет их как эстафетную палочку), и... вот уже время в обоих случаях можно измерить *одними* часами. С чего бы это одни часы — и мы не забываем, что все часы равноправны, — будут показывать больший интервал времени, чем другие?» Однако и эти рассуждения ошибочны. Двое часов, о которых идет речь, *отнюдь не равноправны*. Часы наблюдателя A все время находятся в инерциальной системе отсчета. Что касается часов, передаваемых наблюдателем B наблюдателю C , то эти часы испытывают ускорение, т. е. изменение скорости, как раз в тот момент, когда они переходят от B к C . Следовательно, эти часы оказываются уже в неинерциальной системе. Чем круче изгибается кривая, описывающая путь часов (рис. 7), тем меньше время, за которое передаваемые часы изменяют свою скорость от скорости наблюдателя B до скорости наблюдателя C , и тем больше испытываемое часами ускорение.

Принцип относительности никогда не утверждал, что неинерциальное движение эквивалентно инерциальному движению. Напротив, уже сам факт выделения инерциальных наблюдателей подчеркивает их неравноправие с неинерциальными наблюдателями. Более того, мы знаем в отдельных случаях из опыта, как реаги-

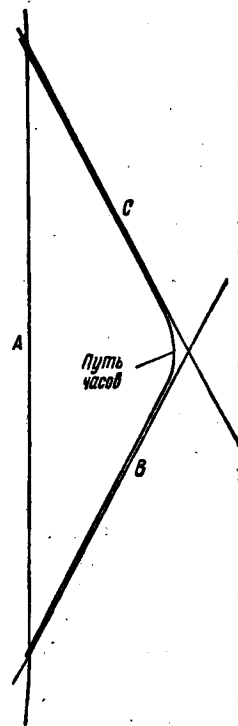


Рис. 7. Парадокс часов при неинерциальном движении часов.

руют часы на инерциальное движение. Вы сами можете без труда выяснить влияние неинерциального движения на ваши часы, если бросите их на пол. В некоторых случаях неинерциальное движение оказывает заметное влияние на ход часов; этого никогда не бывает, если часы движутся по инерции. Следовательно, есть существенная раз-

ница между часами, если одни из них испытали неинерциальное движение, а другие (в нашем случае часы *A*) все время двигались по инерции. Поэтому эти часы ни в коем случае нельзя считать равноправными. Вполне разумно считать, что часы, двигавшиеся все время по инерции, отсчитывают больший промежуток времени между событиями, чем часы, участвовавшие в неинерциальном движении. В этом утверждении нет никакого противоречия.

Однако здесь есть нечто, заслуживающее дальнейшего обсуждения. Что именно происходит с часами, когда им придается ускорение? Принцип относительности не оставляет сомнений в том, что все инерциальные наблюдатели полностью равноправны. Следовательно, если я располагаю двумя часами одинаковой конструкции (благодаря тождественности атомов всегда можно построить часы, идентичные друг другу), я могу вручить первые часы одному инерциальному наблюдателю, а вторые — другому. Нет никаких сомнений в том, что эти часы будут идти одинаково, ибо, согласно принципу относительности, не существует никакого способа обнаружить различие между инерциальными системами.

Утверждение о том, что и те и другие часы, движущиеся инерциально, будут идти совершенно одинаково, не имеет никакого отношения к конструкции часов. Допустим, например, что я располагаю двумя различными устройствами, отсчитывающими время, причем на 98 «тик-так» одного из них приходится всего лишь один «тик-так» другого в том случае, если эти часы находятся у инерциального наблюдателя *A*. Допустим теперь, что я передал двое часов идентичной конструкции инерциальному наблюдателю *B*. Даже ничего не зная о конструкции этих устройств для измерения времени, я могу быть уверен в том, что и инерциальный наблюдатель *B* обнаружит, что на 98 «тик-так» одного устройства будет приходиться один «тик-так» другого. Так должно быть согласно принципу относительности! Конкретная конструкция приборов для отсчета времени ничем не ограничивается. Как я уже говорил, можно воспользоваться атомными часами; но можно определять частоту, с которой вы начинаете ощущать чувство голода. Вы можете отсчитывать время по новым поколениям кроликов или использовать явление β -распада. Любой из этих

способов вполне пригоден для наших целей. Однако я должен предостеречь вас от использования часов с маятником.

Причина, по которой следует быть очень осторожным с этим устройством, стала для меня ясной лет пятнадцать назад во время одной из конференций. Многие из нас положили голову над этим вопросом, и вот на этой конференции в одном из своих последних выступлений крупнейший физик нашего времени Лауэ сказал: «Здесь нет ничего загадочного; маятниковые часы — это не просто ящик, который вы покупаете в магазине; маятниковые часы — это тот ящик, который вы купили в магазине вместе с самой Землей. Если вы хотите передать маятниковые часы от одного наблюдателя к другому, вы должны выдать каждому из них по Земле; конечно, это несколько накладное мероприятие».

Но если мы хотим знать, как ведут себя те или иные часы в процессе ускорения, ответ на этот важный вопрос может быть дан лишь в том случае, когда мы кое-что знаем об устройстве часов. Это очень существенный пункт. Все, что говорилось до сих пор о равноправии часов различных инерциальных наблюдателей, имело совершенно общий характер и относилось к любым приборам, отсчитывающим время, независимо от их устройства. Однако поведение часов при их ускорении существенно зависит от их конструкции. Если, например, наше устройство отсчитывает поколения кроликов, а ускорение настолько велико, что все кролики погибают, то выбранный нами прибор для отсчета времени просто перестает работать. Из повседневной практики мы знаем, что существуют противоударные часы и обычные часы, у которых нет противоударного устройства; эти две конструкции часов по-разному ведут себя при одном и том же ускорении. Таким образом, вопрос о том, вынесут ли наши часы ускорение или нет, сводится к выбору подходящих часов.

Известны часы, способные вынести очень большие ускорения, например радиоактивные ядра. Но и они не могут пережить слишком большие ускорения. Желая сообщить другу очень большое ускорение, мы бомбардируем его другим ядром; однако при слишком сильном ударе наше ядро развалится, как обычные часы. Значит, для любого устройства, отсчитывающего время, — от кроликов до радиоак-

тивных ядер — есть предельное значение ускорения, при котором устройство разрушается. А где-то чуть ниже этого предельного значения (где именно, зависит от конструкции часов) находится граничное значение ускорения, выше которого часы уже идут неверно.

Но в тот самый момент, когда я обмолвился: «часы уже идут неверно», я оказался в довольно щекотливом положении; потому что теперь должен ответить на вопрос: откуда мне известно, правильно идут часы или нет? Из принципа относительности вытекает, что в инерциальных системах отсчета все часы идут одинаково хорошо. Поэтому можно утверждать следующее: если на диаграмме есть искривленный участок пути (а это свидетельствует, что имело место ускорение), то в любой момент времени движения с ускорением я могу указать инерциально движущегося наблюдателя, перемещающегося по касательной к траектории истинного движения с мгновенной скоростью фактического движения. Теперь я могу принять за правильно идущие часы те, которые в течение того времени, когда они движутся вместе с инерциальным наблюдателем, идут в точности так же, как часы той же самой конструкции инерциального наблюдателя. Это обычный геометрический способ спрямления: когда мы измеряем длину дуги кривой, то определяем ее как сумму длин прямолинейных отрезков, которыми мы аппроксимировали кривую. Ту же самую процедуру мы используем для измерения времени.

Нередко встречаются люди, которые задают довольно наивный вопрос: почему же на отсчете времени часами инерциального и неинерциального наблюдателя сказывается то обстоятельство, что часы неинерциального наблюдателя ускорялись? Ведь всегда можно сделать так, чтобы ускорение происходило в течение очень короткого времени. Однако в этих словах не больше здравого смысла, чем в следующем рассуждении. Проведем на карте две дороги, соединяющие два города (рис. 8). Дорога S — кратчайшая дорога между двумя городами, потому что она прямая. Если следовать аргументам сомневающимся в том, что ускорение влияет на ход часов, нужно было сказать так: дорога Q по своей длине лишь немного отличается от дороги S , потому что она «практически все время тоже прямая». Вы уже нашли ошибку в рассуждении? Дорога Q намного

длиннее S не потому, что длина искривленной части велика, а потому, что весь путь искривлен в целом. И часы, испытывавшие ускорение, показывают меньшее время, чем часы, находившиеся у инерциального наблюдателя, не потому, что они большее или меньшее время ускорялись, а потому, что при движении часов имело место ускорение вообще.

Я хочу еще раз подчеркнуть: если известно, что часы ускорялись, нам нужны хотя бы некоторые технические

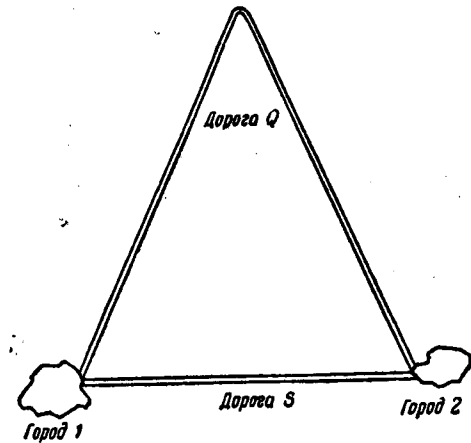


Рис. 8. Из этой схемы видно, что дорога Q намного длиннее дороги S , хотя дорога Q — прямая почти на всем протяжении.

данные о часах. Я могу сказать, как идут часы у инерциальных наблюдателей, не имея ни малейшего представления о принципе их действия. Но если мне нужно знать, как поели себя часы во время ускорения, я должен знать, как они устроены. Часы самого различного устройства всегда будут идти «в ногу» у всех инерциальных наблюдателей; однако часы поведут себя по-разному, если они ускорялись. Вот еще один повод напомнить, что имеется абсолютное различие между инерциальными и неинерциальными системами. Существует безусловное равноправие всех инерциальных наблюдателей, которое не распространяется на наблюдателей неинерциальных. В этом вся суть принципа относительности и всей теории относительности.

3. ТЯГОТЕНИЕ

Все то, о чем мы говорили во второй главе, называется специальной, или частной, теорией относительности. Причина ограниченной применимости этой теории (о чем говорит само название «частная») и природа этих ограничений понимаются не всеми и далеко не всегда*. Ограничение заключается в том, что специальная теория относительности справедлива лишь в том случае, когда нет сил тяготения. Это ограничение не имеет никакого отношения к тому, рассматриваю я ускоренное движение или нет.

Утверждение, что специальная теория относительности применима только к инерциальному движению и что эта теория может использоваться только для рассмотрения инерциального движения, — а такие утверждения, к сожалению, можно услышать довольно часто — совершенно неправильно. Что происходит при ускоренном движении, можно выяснить столь же просто, как и при инерциальном движении. Я уже упоминал, как можно определить течение времени вдоль искривленной траектории, аппроксимируя ее последовательностью отсчетов времени инерциальными наблюдателями. Аналогичным путем можно рассмотреть напряжения, возникающие при ускорении; это делается почти так же, как в ньютоновской теории. Отсюда следует, что с помощью математического аппарата теории можно рассчитать, что происходит с неинерциальным наблюдателем. Конечно, — и я подчеркивал это неоднократно — ощущения неинерциального наблюдателя будут отличаться от ощущений наблюдателя инерциального. Но с помощью специальной теории относительности я могу выяснить, что ощущает любой из инерциальных или неинерциальных наблюдателей.

* В английской и французской литературе можно встретить еще более правильный термин «ограниченная теория относительности». — *Прим. перев.*

Можно подойти к следующему этапу развития теории, к теории тяготения, несколькими различными путями. Разрешите мне сначала воспроизвести путь, ставший уже историческим, которым пошел Эйнштейн. Эйнштейну очень хотелось показать, что равноправие возможно не только у инерциальных наблюдателей, а что оно распространяется и на ускоренно движущихся наблюдателей. Поскольку я все время усиленно подчеркивал колоссальное различие между инерциальными и неинерциальными наблюдателями, естественно возникает вопрос: как же Эйнштейн надеялся найти какое-то равноправие между ними? Ведь когда и подвергаюсь действию ускорения, я испытываю различные неприятные ощущения. Однако Эйнштейн учитывал очень важный физический закон (открытый еще Галилеем), согласно которому *все тела на Земле падают одинаково быстро*.

Когда я участвую в неинерциальном движении, мне кажется, что тела, находящиеся рядом со мной, стремятся от меня удалиться. Самое известное проявление этого эффекта — возникновение кажущихся центробежных сил, которые мы обнаруживаем, если участвуем во вращении и не подозреваем об этом. Хорошо известны также кориолисовы силы и обычные «силы инерции» при ускоренном прямолинейном движении. Все эти силы, возникающие исключительно из-за нашего собственного неинерциального движения, обладают общим свойством: они вызывают ускорение. Если я сам испытываю некоторое ускорение, то замечаю, что другие тела движутся относительно меня с ускорением, равным по величине и противоположно направленным относительно меня. Следовательно, я должен приписать наблюдаемые ускорения силам, действующим на эти тела; согласно второму закону Ньютона, эти силы пропорциональны массам тел. Таким образом получается, что эти фиктивные силы, которые действуют на тела только потому, что я избрал местом своего пребывания неинерциальную систему отсчета, всегда пропорциональны массам тел, на которые они действуют.

Но уже Галилей обратил внимание на то, что существует еще одна сила, обладающая такой же особенностью, — сила тяготения. Она обладает свойством сообщать одно и то же ускорение всем телам, иными словами (если восполь-

зоваться вторым законом Ньютона), эта сила всегда пропорциональна массе тела. Тем самым мы приходим к выводу, что силы тяготения и фиктивные силы, возникающие за счет неинерциального движения наблюдателя, оказываются очень сходными по той реакции, которая появляется у различных тел под действием этих сил.

Обе эти силы совершенно одинаково действуют на разные тела и сообщают им всем одинаковые ускорения; все остальные влияют на различные тела по-разному. Например, силы электрического поля могут оказывать очень сильное воздействие на заряженные тела и совсем не влиять на незаряженные; магнит притягивает железо, но никак не действует на стекло и т. д. Гравитационные силы и фиктивные силы, обязанные моему собственному ускоренному движению, нельзя отличить друг от друга путем сравнения поведения различных тел — скажем, заряженных и незаряженных. Когда я еду в автомобиле по неровной дороге с многочисленными ухабами, мою естественную реакцию можно выразить словами: меня ужасно трясет, потому что движение автомобиля далеко не инерциально. Но с меньшим правом я мог бы сказать и так: хотя автомобиль движется по идеально инерциальному пути, но сегодня ужасно переменное поле тяготения.

Должен признаться, что иногда, когда я роняю вещи на пол одну за другой, я явственно ощущаю, что в этот день сила тяготения особенно велика и, кроме того, у нее появилась заметная меняющаяся со временем составляющая в горизонтальном направлении! Вы можете интерпретировать ваши ощущения при езде по скверной дороге в точности таким же образом. Однако вы не сделаете этого, потому что полны предрассудков: например, вы убеждены в том, что поле тяготения не меняется; кроме того, глядя в окно, вы можете судить о состоянии дороги и т. д. Но если вы лишены предрассудков и не смотрите на дорогу, то вы ничего не можете сказать по вашим ощущениям внутри автомобиля, что происходит на самом деле: то ли плоха дорога, то ли злые шутки проделывает с вами сила тяготения.

Именно в этом смысле можно говорить о равноправии между неинерциальными и инерциальными наблюдателями. Правда, у меня по этому поводу несколько отличная

точка зрения. Я хотел бы напомнить, что в нашем изложении специальной теории относительности краеугольным камнем был первый закон движения Ньютона. И это обстоятельство чрезвычайно важно. Опираясь на этот закон, мы смогли ввести представление об инерциальном наблюдателе, а затем и обо всей совокупности инерциальных наблюдателей, находящихся в относительном движении без ускорения, и т. п.

Но если у нас есть такой важный закон, то будет разумно поставить вопрос о его проверке. Представьте себе, что вас попросили проверить первый закон Ньютона. Исно, что вам следует найти тело, на которое не действуют никакие силы. Вы выбираете какое-то тело и стараетесь убедиться, что на него *не действуют силы*. Если у вас есть опасения, что кто-то удерживает это тело ниточками, вы тщательно осматриваете тело и перерезаете все подозрительные ниточки. Но, может быть, тело удерживается магнитом? Всегда можно выяснить, намагничено ли тело, и в случае надобности нейтрализовать влияние магнитного поля. Аналогично можно поступить и с электрическим полем. Таким образом, можно последовательно избавиться от всех сил, *но только не от сил тяготения*.

Уже из опытов Галилея было видно, что нет средств защиты от сил тяготения. Поэтому вы можете совсем упасть духом и сказать: очень сожалею, но я не в состоянии проверить закон инерции, потому что не могу избавиться от тяготения. Ньютон на этот вопрос отвечал так: отправляйтесь куда угодно, но найдите место, где нет полей тяготения. Это не столько дорого, сколько затруднительно. Вселенная заполнена веществом, и, судя по всему, вам не удастся удалиться на значительное расстояние от вещества.

Но ведь первый закон Ньютона нужен нам *здесь*, а совсем не где-то *там*, потому что вся наша физика строится *здесь*. В итоге мы оказываемся в очень неловком положении с первым законом Ньютона — не забудем, что именно на этот закон опирается понятие инерциальных наблюдателей, да и вся теория относительности, — потому что мы не можем проверить его справедливость. А закон, который нельзя проверить, трудно считать научным законом.

Что остается делать в такой ситуации? Эйнштейн говорит: раз мы не можем избавиться от тяготения, будем считать, что тяготение и инерция — это одно и то же. Ведь и то и другое действует на тела одинаково; силы, обусловленные обоими явлениями, пропорциональны массам тел. Соответственно этому мы переформулируем первый закон Ньютона, подразделив его на две части. Первая часть первого закона Ньютона теперь звучит так: существует некоторое стандартное движение тел, характеризующееся тем, что когда движение тел соответствует этому стандарту, на них не действуют никакие силы. Вторая часть первого закона в ньютоновской формулировке утверждает, что такое стандартное движение представляет собой движение по прямой линии с постоянной скоростью. Эйнштейн предложил опустить вторую часть. У нас еще осталось стандартное движение, но оно происходит вследствие *инерции и тяготения*. Только в том случае, если тело отклоняется от такого движения — свободного падения, — мы можем говорить о действии силы; такая сила есть уже нечто, что сталкивает предметы с их стандартного пути, и потому это уже не тяготение. Тяготение — это вовсе не сила; тяготение и инерция совместно составляют фон стандартного движения.

Конечно, такие стандартные движения весьма сложны: совокупность движений, представляющих собой свободное падение, куда сложнее, чем прямолинейное движение с постоянной скоростью. Но насколько сложнее? Если я выделю на Земле область пространства размером с комнату, то в этой области пространства существует постоянное поле тяготения, которое определяет общее ускорение g , приобретаемое всеми телами. Движение всех тел будет неускоренным, если отвлечься от этого общего для всех ускорения g . В самом деле, если я вычту это значение g , чтобы получить относительное движение, тогда относительное движение всех тел, свободно падающих в комнате, будет выглядеть как движение без ускорения. Очевидно, это возможно лишь потому, что я считал величину g *постоянной* в пределах комнаты. Если бы мне захотелось распространить мои наблюдения, скажем, по всему Атлантическому океану, тогда направление g на берегах Америки составило бы угол около 50° с направлением g в Англии. Следова-

тельно, если производить наблюдения с объектов, свободно падающих в Англии, за объектами, свободно падающими в Америке, то мы вовсе не обнаружим, что они движутся без ускорения.

Позвольте мне подойти к этому несколько иначе. Если вы сами участвуете в свободном падении, то тем самым вы исключаете тяготение вблизи вас. (Это и есть невесомость и космическом корабле.) Но вам не удастся уничтожить таким способом *неоднородность* поля тяготения, которая приводит к относительному ускорению частиц, расположенных неподалеку друг от друга. Такое относительное ускорение частиц-соседей очень существенно. При нашем движении вокруг Солнца две противоположные стороны Земли можно рассматривать как две соседние частицы; поле тяготения Солнца на противоположных сторонах Земли различно. Это обстоятельство служит причиной солнечных приливов на Земле. Аналогичное различие, вызываемое Луной, служит причиной лунных приливов на Земле. Можно сказать, что некомпенсируемая часть гравитационного поля и есть относительное ускорение частиц-соседей.

Если вы хотите построить теорию тяготения, то самый характерный эффект, присущий силам тяготения, который вы должны суметь описать, — это ускорение частиц, расположенных поблизости. Конечно, вы должны учесть выводы специальной теории относительности. Как мы видели, специальная теория относительности опирается на первый закон Ньютона. Этот закон неприменим для гравитационного поля в больших областях пространства. Из-за неоднородности поля свободно падающие наблюдатели, расположенные достаточно далеко друг от друга, обладают относительным ускорением. Однако первый закон Ньютона вполне пригоден в малых областях, когда мы рассматриваем одно тело, свободно падающее относительно второго, тоже свободно падающего тела и пренебрегаем их малым относительным ускорением. Насколько мала область применимости первого закона — это зависит от точности, с какой производятся измерения. Задайте мне требуемую точность, и я укажу вам ту достаточно малую область, для которой относительное ускорение расположенных поблизости инерциальных наблюдателей будет несущественно и, следовательно, первый закон Ньютона — а вместе с ним и

специальная теория относительности — будут вполне применимы к свободно падающим в этой области телам.

Теперь становится ясно, чего мы хотим. Нам нужна теория, описывающая относительное ускорение расположенных по соседству тел; когда же мы пренебрегаем относительным ускорением, она должна сводиться к специальной теории относительности. Именно такой теорией является общая теория относительности Эйнштейна. Она оказалась довольно сложной с математической точки зрения; есть разумные основания для того, что такая теория *должна быть* сложной. По причине математической сложности теории с ней довольно неудобно работать. Но мы верим в нее по многим причинам. Прежде всего потому, что это релятивистская теория; это означает, что в малых областях пространства она сводится к специальной теории относительности. Далее, в больших областях, где поля тяготения слабы, она сводится к ньютоновской теории тяготения, а эта теория в пределах солнечной системы прошла очень жесткую проверку. Наконец, даже в солнечной системе существует ряд небольших отклонений от ньютоновской теории; наблюдения этих отклонений (все они очень и очень малы) свидетельствуют в пользу правильности общей теории относительности.

Мне хотелось бы особо подчеркнуть, что общая теория относительности, будучи релятивистской теорией, непосредственно приспособлена к обращению с самым быстрым из явлений физического мира, а именно со светом; в то же время ньютоновская теория, которая является чисто механической теорией, ничего не может сказать о свете без дополнительных предположений. Общая теория относительности особенно важна для нас, когда нам нужно рассмотреть взаимодействие света с тяготением.

В заключение мне хочется рассказать о некоторых недавних достижениях общей теории относительности — чисто математических результатах, которые способны вызвать у посвященных сильное замешательство. Сначала я объясню, почему я ощущаю замешательство в связи с этими результатами, и уже потом расскажу, в чем собственно состоят эти результаты.

Я уже описывал, как человек в подпрыгивающем на ухабах автомобиле может подумать, что в этот день поле

тяготения особенно разыгралось и сильно меняется со временем. Не исключено, что кто-нибудь может дать волю своим предубеждениям относительно тяготения и объявить мою точку зрения совершенно абсурдной. Предубеждения таковы: 1) заметный вклад в тяготение дают только очень большие источники тяготения; 2) эти большие источники тяготения можно без труда обнаружить иными средствами; 3) источники тяготения в значительной мере постоянны.

Что касается пункта 2, то о существовании Земли под нашими ногами мы знаем не только по наличию поля тяготения. Мы знаем о Солнце не только потому, что Земля обращается вокруг него по орбите. Масса, являющаяся источником поля тяготения, удовлетворяет хорошо известному закону сохранения, а импульс (который по существу описывает скорость движения центра масс) удовлетворяет другому закону сохранения. Отсюда следует, что тяготение ведет себя очень прилично; источники тяготения до известной степени постоянны по отношению к создаваемому ими полю тяготения; их можно без труда обнаружить не только по вызванному ими полю тяготения; заметная сила тяготения создается только сравнительно большими массами. Можно предположить, что если бы Ньютон объяснил движение Земли посредством поля, источник которого нельзя было бы обнаружить никакими иными средствами, кроме наблюдения его тяготения, возможно, мы проглотили бы и эту теорию, но наверняка не столь быстро и не столь охотно. Успех теории Ньютона объясняется прежде всего тем, что главную роль в его теории играл хорошо знакомый объект — Солнце.

Я уже упоминал, что общая теория относительности практически отличается от теории тяготения Ньютона только несколькими второстепенными эффектами. Но не существует ли условий, при которых общая теория относительности приведет к результатам, значительно отличающимся от ньютоновской теории тяготения? Имеются два фундаментальных случая, приводящих к такой ситуации. Во-первых, это случай, когда гравитационный потенциал очень велик. Суть дела сводится к тому, что любое тело обладает определенным запасом потенциальной энергии тяготения, которая пропорциональна массе тела. С дру-

гой стороны, согласно специальной теории относительности, всякое тело обладает собственной энергией, причем эта энергия также пропорциональна его массе. Если первая из этих энергий, а именно гравитационный потенциал, составляет заметную долю энергии, связанной с массой покоя тела, то мы сталкиваемся с ситуацией, когда возникает существенное различие между теориями Ньютона и Эйнштейна.

* Обратите внимание на то, что речь идет о потенциале, а не о самих полях. Вполне возможна ситуация, когда потенциалы очень велики, а поля весьма умеренны (об этой возможности часто забывают). В частности, это реализуется в том случае, когда поля простираются на большие расстояния.

Во-вторых, когда рассматриваются очень быстрые движения, следует пользоваться не ньютоновской теорией, а общей теорией относительности, потому что эта теория является релятивистской. Между прочим, отсюда вытекает, что тяготение подчиняется всем правилам и ограничениям, накладываемым специальной теорией относительности. Одной из закономерностей и ограничений последней является положение, что никакая информация не может быть передана быстрее, чем скорость света в пустоте. В связи с этим можно задать вопрос, что будет, если источник поля тяготения движется очень быстро; под этим я понимаю случай двух источников, имеющих большую относительную скорость, или даже одного источника, который способен очень быстро изменять свое поле тяготения.

Вспомним теперь, что в общей теории относительности — хотя и более сложным образом, чем в ньютоновской теории, — выполняются законы сохранения массы и энергии. Старый вопрос о том, как быстро скажется на поведении Земли внезапное исчезновение Солнца, в общей теории относительности звучит не очень угрожающе. Поскольку справедливы законы сохранения массы, Солнце не может просто так неожиданно исчезнуть. Столь же нелепо задавать вопрос, что случится, если Солнце вдруг начнет двигаться под прямым углом к орбите Земли. Дело в том, что существует закон сохранения импульса, не позволяющий Солнцу проделать подобный трюк. Но у Солнца могут вырасти рога, и нет никаких законов сохранения,

ограничивающих это (разве что мы должны считать, что у Солнца хороший характер). Иными словами, Солнце может изменять свою форму, и вместо сферической принять форму вытянутого эллипсоида. Нет никаких законов, запрещающих такой переход с любой скоростью, лишь бы не было движения частиц со скоростью, превышающей скорость света. Но сила притяжения сфероида отличается от силы притяжения шара, что непосредственно вытекает из ньютоновской теории.

Поэтому мы должны потребовать от теории прямого ответа на вопрос о поведении поля тяготения источников, которые могут проделывать подобные шутки. Теория обязана давать ответ, и она дает вполне определенный ответ. Теория говорит: Земля сойдет со своей привычной орбиты и тот самый момент, когда мы сможем увидеть, что Солнце изменяет свою форму. Иными словами, гравитационная информация также распространяется со скоростью света. Такова одна из проблем не совсем обычного характера, но весьма типичная для релятивистской теории.

Но проблем, собственно говоря, две. Каждый знает, что нельзя послать телеграмму бесплатно — передача информации стоит денег. В физике также есть совершенно общее правило, утверждающее, что передача информации невозможна без затраты энергии. Если форма Солнца меняется из сферической в эллипсоидальную, то мы получаем информацию об этом событии через изменение силы притяжения Солнца. Но это означает, что Солнце должно терять энергию, а следовательно, и массу; тогда и сила притяжения Солнца должна уменьшаться. И теория снова дает вполне четкий ответ на вопрос, как теряется масса в связи с передачей гравитационной информации.

Только что описанное именуется теорией гравитационных волн. К сожалению, эта информация, связанная с передачей энергий и передаваемая гравитационными волнами, распространяется не совсем так, как свет. Трудность здесь состоит в следующем. (О ужас! Я на мгновение преиспугаюсь в математика до такой степени, что просто не могу выдать из себя ни одного общепонятного слова!) Если мы сталкиваемся с дифференциальным уравнением и частных производных второго порядка, относящимся к так называемому гиперболическому типу, то в общих

чертах это значит, что решения нашего уравнения имеют волновой характер. Другими словами, существует произвольная функция времени, описывающая передачу энергии (она описывает фактическую форму Солнца в случае гравитационных волн, распределение токов в излучающей антенне в случае радиоволн и т. д.). Информация распространяется от источника со скоростью, которая не может превышать фундаментальную скорость, входящую в уравнение (скорость света для обоих рассматриваемых нами случаев).

Однако при этом с математической точки зрения возникают две совершенно различные возможности, которые следует рассматривать порознь. В первом случае все возмущения распространяются со скоростью света. Во втором лишь часть возмущений распространяется со скоростью света, а остальные тащатся позади. То, что тащится позади, называют «хвостом» волны. Когда мы имеем дело с обычным волновым уравнением (например, с уравнением, описывающим распространение звука в трех измерениях), то это уравнение относится к первому типу и вся информация распространяется с одной скоростью — скоростью звука. Если я в каком-то месте вызвал шум, то этот шум будет всегда сосредоточен на поверхности расширяющейся сферы. Но если расположить источники звука вдоль прямой и возбудить их одновременно (скажем, выстроить длинный ряд ракет и одновременно поджечь их), то, как легко себе представить, возникает цилиндрическая волна, а не сферическая, как это было в случае точечного источника звука. Когда вы решаете эту последнюю задачу, оказывается, что она принадлежит ко второму типу. Звук сосредоточивается не только на поверхности цилиндра; некоторая часть возмущений среды остается позади.

На первый взгляд это нетрудно понять; в любой точке я получаю информацию о произошедшем взрыве не только от ближайшей к пункту наблюдения точки прямой, соответствующей источнику звука (откуда информация приходит, конечно, быстрее), но и от более удаленных точек этой прямой, откуда звук, естественно, приходит с запазданием. Этим объясняется «хвост» волны. Однако это объяснение, относящееся к частному случаю, не может нас

удовлетворить. Дело в том, что если вместо зарядов, расположенных вдоль прямой, рассмотреть заряды, расположенные на плоскости, то окажется, что распространение волны соответствует первому типу — в точности как и для сферической волны. Все возмущения окажутся на фронте волны, и никаких возмущений позади фронта наблюдать не будет.

У гравитационных волн, по-видимому, есть «хвосты»; другими словами, гравитационные волны принадлежат ко второму типу (полной уверенности в этом у нас нет, потому что с математической точки зрения вопрос очень сложен; однако это весьма вероятно). Только в этом случае мы можем понять результат, недавно полученный Ньюменом и Пенроузом; дело в том, что полученное ими соотношение представляет собой *строгий* закон сохранения. Когда я говорю «строгий», то подчеркиваю то обстоятельство, что величина, о которой идет речь, не может меняться вообще. (Если речь идет не о «строгом» наблюдении, то при этом может служить сохранение массы; я уже говорил, что при достаточно сильном излучении Солнцем гравитационных волн оно теряет свою массу.) Существует величина (а если говорить точнее, то в общем случае существует десять величин, которые в случае цилиндрической симметрии сводятся к одной), строго сохраняющаяся независимо от того, излучаются гравитационные волны или нет. Это величина второго порядка, оцениваемая асимптотически, т. е. достаточно далеко от источника. Используя ньютоновский подход (а это возможно, потому что рассматриваемая система почти статическая), можно сказать, что эта величина является произведением массы, квадратов дипольных моментов, квадратов квадрупольных моментов и других параметров. Такой результат мне представляется крайне неутешительным. Представьте себе тело в форме статического эллипсоида; можно полностью решить задачу о поле тяготения такого эллипсоида, причем даже в рамках теории относительности получить строгое решение; набор возможных полей оказывается столь же богатым, как и в ньютоновской теории. Тогда эта сохраняющаяся величина (я говорю только об одной величине, имея в виду цилиндрическую симметрию) имеет вполне определенное значение, не равное нулю для такого эллипсоида.

Если рассмотреть сферу и найти эту же величину для сферы, то окажется, что она точно равна нулю.

Теперь представим себе следующую ситуацию. Эллипсоид, прожив эллипсоидом полубесконечное время (вплоть до рассматриваемого момента), стал тяготиться своей формой и превратился в сферу. Разумеется, при этом переходе он будет испускать гравитационные волны, но, закончив переход, будет благополучно доживать свой век уже в форме сферы. Однако его поле тяготения не может стать полем тяготеющей сферы. Его прошлое будет довлеть над ним, потому что та величина, о которой я говорил выше, абсолютно сохраняется и поэтому не может изменить свое значение, не равное нулю (т. е. значение для исходного эллипсоида), на значение, равное нулю, соответствующее статическому полю статической сферы. И как бы долго я ни ждал, я все равно не смогу сказать, что поле тяготения рассматриваемого тела в точности совпадает с полем тяготения сферы.

В принципе это ничему не противоречит; это просто означает, что поле тяготения зависит не только от состояния источника в тот момент, когда я его вижу, но также и от его предыстории. Но вот что вызывает серьезную тревогу: почему же поле *никогда* не забывает прошлое? Величина, о которой идет речь, строго сохраняется, и, таким образом, на поведении тела сказывается вся его предыстория, вплоть до минус бесконечности. Думается, это обстоятельство в значительной мере разрушает основы ньютоновского подхода: источник поля тяготения непосредственно дан в ощущении, его можно просто видеть. Если я займусь подробным исследованием поля тяготения, то я смогу узнать не только то, что происходит *сейчас*, но и выяснить, что происходило с источником с незапамятных времен. Я уверен, что ответственность за такое положение несут некоторые «хвосты» этих волн, которые не сумели вовремя стронуться с места и остались позади; их поведение связано с тем обстоятельством, что интересующая нас величина, как я уже упоминал, может быть оценена лишь асимптотически на бесконечности. Конечно, не исключено, что я не слишком строг, называя это тело сферой; в самом деле, раз я заговорил о бесконечности, не исключено, что уже само пространство не обладает идеальной сферичес-

кой симметрией; а в таком пространстве и тело не может превратиться в идеальную сферу. Тело попытается лишь приблизить свою форму к сферической настолько, насколько это возможно в заданном пространстве.

У меня сложилась уверенность, что результат Ньюмена и Пенроуза принадлежит к одному из тех злосчастных открытий, похожих на открытие квадрупольного момента дейтрона, которые отбрасывают наше мышление на много лет назад. Но время от времени такие результаты все же появляются. Результат Ньюмена и Пенроуза означает, что связь между полями и порождающими их источниками (наблюдаемая иными способами), к сожалению, не столь проста, как этого хотелось бы. Если бы переход к сферической форме происходил по экспоненциальному закону, я не стал бы задумываться, а набрался бы терпения и подождал. Но, имея в своем распоряжении величину, которая никогда не меняется, я оказываюсь связанным по рукам и ногам и должен приписать определенные свойства поля тяготения отдаленному и неясному прошлому.

4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ИНЕРЦИИ И ВСЕЛЕННАЯ

В предыдущей главе я отмечал, почему ввиду невозможности проверки первого закона Ньютона нам приходится рассматривать инерцию и тяготение как одно целое и каким образом это обстоятельство может служить основой для построения общей теории относительности. Мы пришли к выводу, что инерция и тяготение оказывают совершенно одинаковое *воздействие* на тела. Но что мы знаем об источниках инерции и тяготения? Источники поля тяготения для нас достаточно ясны (по крайней мере, так нам представляется). Но что мы знаем об источнике инерции?

Этот вопрос приводит нас к известной проблеме, именуемой «принципом Маха». Вообще говоря, именно в ньютоновской теории отбираются определенные состояния движения, называемые *инерциальными*. Что означает такой отбор? Чем определяется этот отбор? С точки зрения Ньютона, существует абсолютное пространство; инерция рассматривается относительно этого абсолютного пространства. Таким образом, ускорение оказывается абсолютным, как я подчеркивал выше.

Однако в таком утверждении содержится несколько сомнительных мест. Во-первых, мы можем спросить: если абсолютное пространство существует, то почему оно так тщательно маскируется? Почему оно не обнаруживается по крайней мере через скорость, если уж оно не сказывается через положение в пространстве? Почему нам нужно добираться до ускорений, до вторых производных, чтобы хоть сколько-нибудь почувствовать существование этого абсолютного пространства? Положение становится куда более серьезным, если мы заметим, что само по себе введение абсолютного пространства ничего объяснить не может. Эта гипотеза не принадлежит к таким, какие можно проверить экспериментом или наблюдением. Это просто-напросто другой способ вы-

ражения того, что мы уже знаем, а именно: ускорение в ньютоновской схеме является абсолютным; но такая мысль противит современному физическому. Противоположный подход, отраженный в принципе Маха, пожалуй, дальше всего был развит самим Эйнштейном, когда он заявил, что в последовательной теории относительности не должно быть инерции вещества относительно пространства, а должна рассматриваться лишь инерция вещества относительно вещества.

Выдвинув такую формулировку, Эйнштейн самым очевидным образом отождествил источники инерциального поля с материальными телами. Вместе с тем имеются весьма серьезные трудности в отождествлении и обнаружении таких источников. В обычных условиях, занимаясь физическими исследованиями в лаборатории, мы имеем дело с объектами, которые можно включать и выключать. Тогда нетрудно выявлять причинно-следственные связи между явлениями. Когда что-то включено, явление *A* происходит, когда выключено — нет. Когда включение произведено, можно предположить наличие некоторой связи между тем, что включается, и явлением *A*. Но мы знаем, как трудно выключить тяготение; это весьма реальная трудность, которая не может нас не беспокоить. Тем не менее мы довольно много знаем о различных полях тяготения в солнечной системе, а основные законы движения планет по орбитам были найдены Кеплером много лет тому назад.

Между прочим, было бы неплохо поразмыслить о том, как развивалась бы физика, если бы в солнечную систему входили только Земля и Солнце. Условия для жизни на Земле очень мало отличались бы от нынешних, однако развитие многих важнейших отраслей науки пошло бы совсем иным путем. Астрономия привлекла к себе всеобщее внимание благодаря наблюдаемому даже простым глазом движению планет; усилия в этом направлении достигли своего наивысшего развития в трудах Кеплера, Галилея и Ньютона. Если бы нам не преподнесли такую великолепную внеземную лабораторию, где происходит так много удивительных явлений, если бы мы знали лишь то, что Земля движется по орбите вокруг Солнца, то прогресс науки вряд ли был бы столь значительным, не говоря о том,

что интерес к астрономическим явлениям даже едва ли бы возник на заре развития человечества.

Вернемся снова к нашей теме. Мы действительно не в состоянии включать и выключать силы тяготения, но у нас более чем достаточно примеров движения в самых различных полях тяготения. Наличие инерциальных сил, без сомнения, значительно осложнило бы проблему движения тел солнечной системы. Поэтому из того факта, что теория Ньютона превосходно описывает движение планет и их спутников, можно сделать следующий вывод: инерциальная система отсчета является единой неизменяемой системой отсчета, охватывающей всю солнечную систему. Другими словами, инерциальными эффектами, обусловленными телами, входящими в солнечную систему (Солнцем и Землей, Юпитером и Луной), можно полностью пренебречь. Если рассматривать эти тела — да и вообще вещество — в качестве источника инерциальных полей, то на первый взгляд все существующие данные говорят против этого, потому что самые массивные тела, которые нам известны, явно оказывают весьма незначительное влияние на инерцию тел.

Можно ли, несмотря на все эти возражения, спасти нашу идею? Да, но только в том случае, если мы передадим дело в высшую инстанцию, выйдем за пределы нашего ближайшего астрономического окружения; иными словами, если мы сумеем продвинуться подалеже в космическое пространство. Если источники инерциального поля в подавляющем большинстве случаев находятся на колоссальных расстояниях, а близлежащие к нам тела играют несущественную роль, то не лишено смысла предположение о том, что поле сил инерции *более или менее постоянно* в пределах солнечной системы. Довольно трудно придумать такой закон действия сил, согласно которому величина силы возрастала бы по мере удаления от источника. Это было бы уж слишком против шерсти. Но ничего подобного не требуется. Если сила обратно пропорциональна расстоянию, то удаленные тела могут иметь преимущество над близлежащими телами за счет своей колоссальной массы. Когда справедлив закон обратной пропорциональности силы квадрату расстояния, действие близких и удаленных тел почти одинаково (парадокс Ольберса); если бы сила тяго-

ности была обратно пропорциональна четвертой степени расстояния, близлежащие тела играли бы значительно большую роль, чем удаленные.

Эти рассуждения сразу подводят нас к фундаментальной идее о том, что если источник инерциального поля можно отождествить с веществом, то закон, определяющий зависимость инерции от массы тела, не может содержать слишком высокие обратные степени расстояния от этого тела.

Не исключено, что я говорю слишком бодро об отождествлении отдельных источников инерции: этот способ рассуждений чересчур прямолинеен. Если инерциальные поля существенно нелинейны (что очень вероятно), то совсем неразумно надеяться выделить индивидуальные источники. С другой стороны, описываемая схема приводит к выводу, что инерция (если у нас вообще есть хоть какой-то разумный способ ее объяснения) должна быть тесно связана с космологическими проблемами. Больше ее просто не с чем связать. И это очень грустно, потому что куда приятнее сопоставлять явления с такими вещами, о которых вы что-то знаете, чем с такими вещами, о которых вы не знаете почти ничего. Но, поскольку никаких других обвиняемых подобрать не удастся, мы вынуждены связывать инерцию со строением Вселенной как целого.

Но если у нас есть теория принципа Маха, то можно ли ее проверить? Если теория представляет собой нечто большее, чем просто игру в слова, если теория претендует на то, чтобы быть научной, она должна допускать опытную проверку. Мне представляется, что на этом пути стоят грандиозные трудности. Можно указать немало способов, которые позволили бы (по крайней мере в принципе) подвергнуть теорию Маха опытной проверке. Ведь даже в том случае, если влияние очень далеких масс настолько сильно, что почти полностью забывает влияние Солнца, все равно должен существовать слабый остаточный эффект от Солнца, который при некотором усилии с нашей стороны можно было бы обнаружить. К тому же Вселенная отнюдь не однородна. Нам очень повезло в этом отношении, потому что Солнце расположено на периферии Галактики. Согласно закону обратной пропорциональности силы от расстояния, наша собственная Галактика несет большую

ответственность за инерцию, чем Солнце и Земля, в той части пространства, где находимся мы; поэтому должны быть определенные эффекты, обусловленные Галактикой. Не исключено, как полагают некоторые авторы, что сама масса (инертная масса) не является скалярной величиной, а представляет собой тензор, так что инерция проявляется по-разному в разных направлениях. Не исключено, что именно в этом направлении удастся опытным путем проверить принцип Маха.

Вот почему вряд ли стоит сейчас целиком отказываться от этого принципа. Однако это вовсе не означает того, что у нас уже есть надежная теория или что не сегодня-завтра мы сумеем поставить какой-то контрольный опыт. Но совершенно необходимо — перед тем как всерьез размышлять о принципе Маха — показать, что этот принцип допускает опытную проверку.

Эйнштейн был первым, кто серьезно воспринял принцип Маха, и он попытался построить свою теорию в связи с этим принципом. Год спустя после создания общей теории относительности он несколько видоизменил свою теорию, надеясь удовлетворить принципу Маха. Предложенная им проверка, чисто теоретическая, заключалась в следующем. В теории относительности после задания источников определены уравнения для полного поля, т. е. для комбинации инерциального поля и поля тяготения, посредством которых описывается стандартное движение, иными словами, траектория свободного падения. Эйнштейн обнаружил, что если взять общую теорию относительности в немодифицированном виде и предположить, что источников нигде нет, то тем не менее вы сможете получить решение для комбинированного поля. Это решение описывает поле без тяготения, так что все тела движутся строго прямолинейно с постоянными скоростями.

Эйнштейн считал этот результат совершенно неприемлемым. Если инерция обязана присутствию вещества, то в отсутствие вещества не должно быть и инерции. В указанных условиях движение изолированной частицы поэтому должно быть полностью неопределенным.

Посредством модификации своей теории Эйнштейн хотел убедиться, что его уравнения не имеют решения, когда нет вещества, и дают разумные решения в том случае, ког-

да вещество в наличии. Эйнштейн убедился, что модифицированные уравнения дают разумные решения в присутствии вещества, и думал — на основе правдоподобных математических заключений, — что его уравнения не могут иметь решений в отсутствие вещества. Однако его заключение оказалось ошибочным. Вскоре де Ситтер показал, что модифицированные уравнения Эйнштейна имеют допустимые решения даже при отсутствии вещества. Сначала эти решения рассматривались просто как математический курьез, но на самом деле, как выяснилось позже, это были решения, соответствующие расширяющейся Вселенной.

Эйнштейн по этому поводу сказал так: «Если модификация уравнений не приводит к нужному результату, от нее следует отказаться». Впоследствии он всегда пользовался только первоначальной немодифицированной теорией. Но вскоре после получения этих результатов астрономы открыли красное смещение в спектрах далеких галактик. Выяснилось, что это красное смещение можно интерпретировать с помощью решений, соответствующих Вселенной расширяющегося типа, найденных впервые де Ситтером*. Поэтому, несмотря на возражения Эйнштейна против модификации его теории, именно она имеет наибольшее значение для теоретической космологии.

Я не хочу вдаваться в последующую историю так называемого космологического члена, но отмечу, что, с моей точки зрения, тот способ проверки теории, которым пользовался Эйнштейн, был явно неподходящим. Я придерживаюсь крайне эмпирической точки зрения на общую теорию относительности. Это такая же теория, как и все другие физические теории. Поэтому ее основания лежат в экспериментах и наблюдениях. Мы вправе ожидать от добротной теории, чтобы она простиралась *чуть-чуть дальше* за те эксперименты и наблюдения, на которые она опирается. Мы вправе рассчитывать, что она сможет объяснить нечто большее, чем те частные обстоятельства, кото-

* Бонди совершенно неверно приписывает де Ситтеру приоритет в нахождении решений уравнений Эйнштейна, соответствующих расширяющейся Вселенной. Эти решения были найдены советским ученым А. А. Фридманом. — *Прим. перев.*

рые послужили основой для ее построения. Но мы не можем рассчитывать на то, что теория окажется справедливой в условиях, резко или полностью отличающихся от условий, к которым она с самого начала относилась.

Все наши наблюдения и эксперименты проводились и проводятся в материальной Вселенной. Ожидать, что теория, созданная в этих условиях, окажется работоспособной в пустой Вселенной, по-моему, совсем неразумно. Любая из теорий, даже самая лучшая, не настолько хороша, чтобы выдержать экстраполяцию такого порядка. Можно без труда продемонстрировать на небольшом отрезке развития наших знаний, как всякий раз, когда точность эксперимента возрастала на несколько порядков, появлялись совершенно новые представления, о которых раньше даже не помышляли. Мысль, что мы можем безболезненно понижать плотность Вселенной на неограниченное число степеней десятки, оставляя неизменными все наши представления, представляется мне мало правдоподобной.

В наше время существуют три различные точки зрения на принцип Маха и его связь с общей теорией относительности. Некоторые считают, что весь вопрос о принципе Маха целиком надуман, ибо этот принцип не приводит к теории, которая допускала бы опытную проверку. Вторая точка зрения состоит в том, что в общей теории относительности все верно и она не нуждается ни в какой модификации; однако она должна применяться только к подходящей Вселенной. Мы не можем ожидать от теории, построенной на основе локальных наблюдений за тяготением и других наблюдений и экспериментов (а именно связанных со специальной теорией относительности), чтобы она оказалась применимой к самой общей модели Вселенной, резко отличной от той Вселенной, в которой мы живем. Пока вы применяете общую теорию относительности к моделям Вселенной, в общих чертах сходных с нашей собственной, будет постоянно вставать вопрос о принципе Маха, — утверждают сторонники этой точки зрения. Конечно, здесь трудно надеяться на быстрый прогресс, потому что наши сведения о строении Вселенной как целого крайне неопределенны. Однако можно отметить, опираясь на нынешние данные, что немалое число разумных и правдоподобных моделей Вселенной, так или иначе объ-

единенных с общей теорией относительности, ведет к приемлемым результатам в духе принципа Маха. Речь идет о том, что локальные инерциальные системы отсчета, по-видимому, неплохо увязываются с удаленным веществом Вселенной. Третья точка зрения заключается в том, что это недостаточно удовлетворительно и потому необходимо разработать теорию, которая дает объяснение принципу Маха с достаточными подробностями.

В пользу этого положения можно привести довольно убедительные доводы. Один из них, который на меня производит самое сильное впечатление, связан с постоянной тяготения. Эта постоянная, входящая в закон тяготения, отражает связь между гравитационными и инертными свойствами вещества. Что касается гравитационных свойств, то у нас есть основания думать, что они самым прямым образом связаны с локальными источниками. Как и уже отмечал, согласно любой теории, объясняющей принцип Маха, инерциальные свойства обусловлены отдаленными источниками. Если Вселенная как целое подвержена эволюции (может случиться, что этого нет), то структура и расположение отдаленных источников будут с течением времени изменяться. Тогда придется столкнуться и с изменением самой постоянной тяготения с течением времени. Это изменение обусловлено тем, что инерциальные свойства, определяемые расположением отдаленных источников во Вселенной, также начнут изменяться.

Не имея в своем распоряжении теории, определяющей связь инерциальных свойств вещества «здесь» с отдаленным веществом, и не зная, как зависят инерциальные свойства от отдаленных областей, нельзя даже подойти к решению этой задачи. В общей теории относительности (по крайней мере в общепринятой ее трактовке) мы скорее всего должны принять постоянную тяготения за истинную константу. В этом можно усмотреть требование о построении теории, объясняющей происхождение принципа Маха. Но, начиная действовать в этом направлении, мы испытываем серьезные трудности не только потому, что подтверждение теории путем наблюдений можно ожидать лишь в неопределенном будущем, но также и потому (если мы внимательно следили за моими рассуждениями о пустой Вселенной), что различные теоретические проверки

не слишком эффективны. Иными словами, этот вопрос остается открытым.

Были сделаны различные попытки подойти к этой проблеме. Я хочу коротко рассказать о недавно появившейся работе Хойла и Нарликара*. Мне эта работа представляется особенно интересной, поскольку она касается моего любимого конька — связи между частицами и полями. Пример из ньютоновской теории поможет нам понять, как возникает такая проблема. Можно записать ньютоновскую теорию тяготения в двух различных формах, которые почти эквивалентны друг другу. Я могу либо записать лапласиан для потенциала гравитационного поля, приравняв его заданной плотности вещества, умноженной на соответствующий множитель, либо я могу сказать, что искомым гравитационный потенциал пропорционален сумме $\Sigma(M/R)$, в которой масса каждой частицы, входящей во Вселенную, делится на ее расстояние до той точки поля, в которой определяется потенциал. Обе формулировки являются эквивалентными (что подтверждается хорошо известным простым расчетом).

Но, строго говоря, это не совсем верно: между указанными формулировками есть определенное различие. Если я запишу гравитационный потенциал в виде $\Sigma(M/R)$, то это будет правильный ответ: сделал вычисления безошибочно и не пропустив ни одной частицы, я получу безукоризненное решение. С другой стороны, если я знаю повсюду плотность вещества и ввиду этого могу задать уравнение Пуассона во всех точках пространства, то я получаю только дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка для потенциала. Чтобы получить однозначное решение, необходимо задать еще *граничные условия*. Необходимость задания граничных условий снова отбрасывает нас к неприятному общению с космологией, с объектами, которые удалены от нас на чудовищные расстояния. И мы снова оказываемся там, откуда начали.

Перейдя к общей теории относительности, мы обнаруживаем, что ее общие уравнения для поля тяготения можно

*Hoyle F., Narlikar I. V., A New Theory of Gravitation, Proc. Roy. Soc., A282, 191—207 (1964). [См. также «Сверхзвезды», изд-во «Мир», М., 1965.] — Прим. перев.

строго сопоставить с формулировкой ньютоновской теории — строгое уравнение Пуассона. Уравнения общей теории относительности представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. И мы опять сталкиваемся с необходимостью задавать граничные условия того или иного вида, чтобы решить задачу. Конечно, в общей теории относительности уравнения относятся к гиперболическому типу, однако от этого не становится намного легче. Но если же мы располагали бы выражениями типа $\Sigma(M/R)$, то сразу же получили бы полный ответ; мы определили бы поле, избежав всех неприятностей, связанных с граничными условиями. То, что нам нужно, — это действие на расстоянии (дальнодействие) или, если угодно, формулировка общей теории относительности как теории частиц. Именно это и попытались осуществить Хойл и Нарликар.

Их вдохновил на это предприятие тот факт, что восемьдесят лет спустя после того, как Максвелл сформулировал полевую теорию электромагнетизма, Уилер и Фейнман сумели придать ей вид теории дальнодействия, теории частиц. Другими словами, хотя в течение очень продолжительного времени считалось, что по крайней мере в электромагнитной теории полевая точка зрения является единственно возможной, они смогли показать, что существует вполне эквивалентная формулировка теории для электромагнитных явлений, которой придана форма дальнодействия. Но это было сравнительно легко осуществить для электромагнитной теории, потому что электромагнитная теория обладает восхитительным свойством — она линейна. Поэтому в теории электромагнетизма вы действительно можете получить нечто вроде $\Sigma(M/R)$. Но общая теория относительности, как я уже говорил, — нелинейная теория. А задача формулирования нелинейной теории в духе дальнодействия значительно труднее, чем линейной.

Вот почему Хойл и Нарликар были вынуждены искать новую формулировку теории тяготения. Дело оказалось не только сложным, что очень многие не согласны с тем, что авторам действительно удалось получить формулировку строго в духе дальнодействия. Говорили о вкусах и даже влились в терминологию. Сами авторы подвергли свою теорию жесткому испытанию на пустую Вселенную; эта про-

верка, по-моему, не имеет особого смысла. Хойл и Нарликар сумели также показать, как в случае многих частиц их теория переходит в общую теорию относительности. Таким образом, мы имеем дело с новой попыткой увязать принцип Маха с общей теорией относительности.

Теория такой степени сложности нуждается в подробнейшем исследовании, чтобы обнаружить ее следствия во всех вероятных и даже невероятных условиях. Конечно, на это нужно время. Более того, теория, которая почти не поддается проверке, не может быть принята (или отвергнута) по одним субъективным соображениям. Можно только надеяться, что теория, включающая в себя принцип Маха, будет построена в такой формулировке, которая допускает опытную проверку, по крайней мере в принципе, в отличие от теории, опирающейся на абсолютное пространство или еще что-нибудь столь же недоступное. Но именно потому, что теория Хойла — Нарликара в системе из многих частиц приводит к общей теории относительности, я не вижу никакого пути (и не думаю, чтобы это могли сделать сами Хойл и Нарликар), чтобы можно было отдать предпочтение их теории перед общей теорией относительности в той Вселенной, с которой мы имеем дело, или наоборот.

Разрешите мне закончить раздел обсуждением других трудностей, связанных с тем, что мы живем именно в этой Вселенной. Проблемы космологии настолько сложны — как с философской, так и с практически-научной точек зрения — еще потому, что наша Вселенная *уникальна*. Я уже говорил в начале этой главы о физическом эксперименте как о возможности включать и выключать силы или по крайней мере о возможности иметь под рукой многочисленные примеры движения, вроде тех, которые имеют место в солнечной системе. Но в случае Вселенной у нас есть только один-единственный пример, что не может не ограничивать наше мировоззрение.

Когда Ньютон формулировал теорию тяготения, он — что вполне естественно, разумно и правильно — формулировал ее с помощью дифференциальных уравнений, потому что дифференциальные уравнения — это тот инструмент, который позволяет собрать великое множество различных явлений под одну крышу. Дифференциальные

уравнения оказываются полезными и для описания движения падающего яблока, и для описания движения Луны, Земли, Юпитера и его спутников, потому что движения всех этих тел представляют собой явления одного и того же рода. Движение этих тел описывается решениями соответствующих дифференциальных уравнений. Если бы в наших руках оказалось нечто, еще более ограниченное, чем уравнения Ньютона, это означало бы, что мы лишены достаточно широкой рамки, куда мы могли бы вставить те многочисленные случаи, в которых применяется тяготение. Однако когда речь идет о Вселенной, у нас под руками оказывается только один экземпляр. А к чему тогда какая-то дифференциация? Нам следует рассматривать *движение* Вселенной, а не *закон ее движения*. Разумеется, нелепо описывать отдельно движение яблока, движение Луны и т. д. Но когда у вас нет ничего, кроме падающего яблока, крайне неумно заниматься чем-либо другим, кроме описания движения этого яблока. Следовательно, лучшее, на что можно надеяться в отношении движения Вселенной, так это описание ее движения, а не отыскание закона движения.

Мне хотелось бы вспомнить то, что я говорил раньше об иной формулировке ньютоновского закона инерции в общей теории относительности: вещество подчиняется вполне определенному закону движения, если силы отсутствуют. Сила тогда выглядит как нечто, что заставляет вещество отклоняться от этого стандартного движения. Однако какое же движение можно выбрать за стандартное во Вселенной, кроме того реального движения тел, которые мы наблюдаем? Но если встать на изложенную точку зрения, то спрашивать о силах, вызывающих движение Вселенной, — это по существу задавать вопрос, не имеющий никакого отношения к делу. Ведь самое лучшее, что мы можем делать, — это описывать движение, а для наблюдения у нас есть вообще одно движение и никаких отклонений от него. Вселенная движется так, как она движется, и все представление о силах в данном контексте полностью утрачивает свой смысл.

Возможно, что большая часть тех загадок и парадоксов, которые связаны со строением Вселенной, возникла потому, что мы не научились ставить правильные вопросы. Но со-

всем не просто выяснить, как нужно правильно ставить вопросы. Мне кажется только, что ошибочность постановки некоторых вопросов все же очевидна. Например, не следует спрашивать: какие силы вызывают наблюдаемое движение? Или: как бы выглядела Вселенная, если бы в ней совсем не было вещества? Но, сказав о том, что постановка некоторых вопросов ошибочна, мы ничего не узнаем о том, какая же постановка может считаться правильной. Нам нужно еще многое понять. Ключевая проблема состоит в том, что Вселенную невозможно изолировать от нашей обычной физики. Она входит в каждое ее звено. Мне представляется — наряду со всеми теми, кто считает, что в принципе Маха что-то есть, — что Вселенная неявно участвует в любом физическом эксперименте, поскольку в любом физическом эксперименте проявляются инертные свойства тел.

Хотелось бы напомнить, что я принадлежу к убежденным сторонникам важности парадокса Ольберса. Очень существенно, что наша расширяющаяся Вселенная действует как сток для света, что мы посылаем куда больше света, чем получаем извне и что Вселенная очень далека от того, чтобы находиться в состоянии термодинамического равновесия. Весь наш подход к любому физическому эксперименту определяется именно этим. В любом эксперименте, в котором часть энергии переходит в излучение, мы считаем это излучение уходящим в бесконечность и потому потерянным для нас. Такая манера мышления обусловлена тем, что мы живем во Вселенной, обладающей очень своеобразными свойствами. И, таким образом, мы находимся в очень затруднительном положении, когда наша физика, пронизанная дифференциальными уравнениями, оказывается местами перепутанной с чисто описательной физикой, имеющей дело с движением Вселенной как целого. Но где оканчивается локальная физика и начинается космология — это вопрос самый темный и неопределенный из всего того, о чем я говорил. Этим примером науки, которая не только не в состоянии дать ответы, но даже неспособна четко сформулировать самые важные для себя вопросы, вполне уместно, как нам кажется, закончить эту небольшую книгу.

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ

1. Бонди Г., Относительность и здравый смысл, изд-во «Мир», М., 1967.
2. Бонди Г., Гравитационные волны (см. дополнение стр. 80—103). Пересмотренный вариант этой статьи опубликован в журнале *Naturwissenschaften*, 1970.
3. Найерлс Р., Законы природы, Физматгиз, М.—Л., 1958.
4. Popper K. R., *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London, 1959.
5. Popper K. R., *Conjectures and Refutations*, Rontledge and Kegan Paul, London, 1963.
6. Sciama D. W., *The Unity of the Universe*, Faber and Faber, London, 1959.
7. Вайскопф В., Наука и удивительное, изд-во «Наука», М., 1965.
8. Сиамма Д., Физические принципы общей теории относительности, изд-во «Мир», М., 1971.
9. Тейлор Э., Уилер Дж., Физика пространства-времени, 2-е изд., изд-во «Мир», М., 1971.

ДОПОЛНЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ*

Экспериментальное изучение гравитационных волн ставит весьма сложные проблемы главным образом вследствие чрезвычайной слабости гравитационных полей; волны могут стать заметными только в случае очень массивных тел, движущихся с большими ускорениями. Хотя в настоящее время уверенные наблюдения гравитационных волн и отсутствуют, можно все же сделать некоторые заключения относительно их основных свойств.

Эта статья посвящена связи теории гравитации со всеми остальными областями физики и обзору некоторых путей развития этой теории за последние годы.

Гравитационные волны не только непривычны, даже по названию, но явно весьма трудны для наблюдения. Несмотря на это, их изучению уделяется заметное внимание, и оно является весьма поучительным, так как с ним связано большое число областей физики. Они занимают среднее положение между физикой явлений огромного масштаба и квантовой теорией, между теорией гравитации и проблемами излучения электромагнитных и других волн, между чистой математикой и физикой. Настоящее исследование посвящено гравитационным полям быстро движущихся тел. Гравитационные силы незначительны, пока тела, создающие их, невелики по массе, а для очень массивных тел высокие ускорения практически неизвестны — отсюда и экспериментальная «непривлекательность» этой задачи. Исследователь неизбежно сталкивается с математическими вопросами, требующими применения наиболее совершенной современной теории гравитации, именно общей теории относительности Эйнштейна; значительная доля

* В книге: Дж. Вебер, Общая теория относительности и гравитационные волны, ИЛ, М., 1962, Дополнение II, стр. 236—259 (перевод Н. В. Мицкевича).

трудностей рассматриваемой проблемы возникает вследствие математической сложности этой теории. Чтобы выяснить, почему эта теория пользуется доверием, достаточным для оправдания усилий, затраченных на исследование гравитационных волн, необходимо углубиться в историю физики и рассмотреть основания теории. Так как наш вопрос переплетается со многими областями физики, то прежде чем проблема гравитационных волн сможет быть сформулирована, необходимо надлежащим образом провести достаточно детальный обзор ряда аспектов этих областей.

1. Ньютонская механика

Хорошо известно, что три закона Ньютона дали механике твердую базу и обеспечили известный период ее быстрого развития. Однако истинный смысл этого вклада не всегда отчетливо понимается. Напомним, что Ньютон связал силу с ускорением, тогда как раньше считалось, что она связана со скоростью. В чем состояла огромная ценность этого, по существу нового, определения силы, в котором ускорение заменило скорость? Причину можно ясно увидеть, наблюдая движение Земли. Рассматривая силу, вызывающую это движение, и предполагая, что она связана именно со скоростью, как считали в доньютоновскую эпоху, приходилось причину движения искать в направлении этой скорости. Но смотреть в направлении скорости Земли бесполезно; иногда можно увидеть одну какую-нибудь незначительную звезду, иногда другую, а иногда и совсем ничего.

Если, однако, взглянуть в направлении ускорения Земли, то там окажется Солнце, и этот-то важнейший объект совершенно естественно считать своего рода причиной орбитального движения Земли. Выражаясь несколько иначе, можно сказать, что ньютоновское определение силы позволяет связать наблюдаемую кинематическую величину — ускорение Земли — с чем-то таким, что можно наблюдать оптически, именно с направлением на Солнце. Характерная черта любой удачной научной гипотезы состоит как раз в том, что она объединяет два прежде не связанных между собой типа наблюдения, что и достигнуто в дан-

ном случае. Долговременный успех ньютоновской механики именно в этом и состоял. Более того, мы сталкиваемся здесь с идеей, к которой будем неоднократно возвращаться в этой статье, а именно с идеей принципиального единства физики. Физику нельзя подразделить на некоторое число не связанных между собой разделов, например на механику, оптику, учение о теплоте; все эти области связаны друг с другом множеством способов, и много исключительных важных общих физических понятий было бы потеряно, если бы человеческий разум не уловил эти связи. Нельзя иметь один тип физики для механики, а другой — для другой отрасли физики; механика никогда бы не была построена без оптических наблюдений, и не существует такой вещи, как чисто механический эксперимент. Любой вопрос всегда затрагивает более чем одну область физики, и, как мы только что заметили, самые основы механики зависят от единства механических и оптических наблюдений.

Следующий пункт, на который должно быть обращено внимание, — это характер системы отсчета, относительно которой измеряется ускорение. Сила в механике Ньютона рассматривается как нечто реальное, имеющее истинный физический смысл. Второй закон Ньютона предполагает, следовательно, что ускорение столь же истинно, как и сила. Но ускорение есть мера изменения скорости, и скорость — мера изменения положения; а положение, скорость и ускорение — все некоторым образом относительны. Состояние движения измеряющей системы определяет, какие именно значения каждой из этих переменных получаются при их измерении.

Таким образом, если ускорение — физическая реальность, т. е. нечто такое, что может быть отождествлено с действительной физической переменной, именно силой, то приемлемыми при физических наблюдениях окажутся только такие системы отсчета, которые дают для ускорения правильное значение. Если мы имеем такую систему отсчета и берем другую, движущуюся относительно первой без ускорения, т. е. с постоянной скоростью в фиксированном направлении, то скорости, измеренные во второй системе, будут отличаться от скоростей, измеренных в первой, но ускорения, измеренные в каждой из них, будут совпадать. Вторая система будет, следовательно, приемлема в

качестве стандартной системы отсчета совершенно так же, как и первая.

Таким образом, в механике Ньютона отсутствуют выделенные системы отсчета, отсутствует какой-либо стандарт покоя для Вселенной в широком смысле и существует множество систем отсчета, каждая из которых находится в относительном неускоренном движении. Любая подобная система отсчета называется инерциальной, и ускорения, наблюдаемые из инерциальной системы, связаны с силами согласно второму закону Ньютона.

Итак, в ньютоновской механике существует резкое различие между двумя типами систем отсчета, а именно инерциальными и неинерциальными; только силы, измеренные в инерциальных системах, считаются действительными. При измерениях в ускоренной системе отсчета, т. е. в неинерциальной, возникают фиктивные силы. Наиболее известная из них — центробежная сила, которая появляется, когда мы имеем дело с вращающейся системой координат; существует ряд других сил подобного типа.

Так как выяснено, что силы оказываются в любой инерциальной системе отсчета одними и теми же, то все инерциальные системы с точки зрения механики совершенно эквивалентны. Следовательно, можно установить принцип относительности Ньютона:

1. Существует резкое различие между инерциальными и неинерциальными системами.
2. Любые две инерциальные системы движутся без ускорения друг относительно друга.
3. Любые две инерциальные системы совершенно эквивалентны в механическом смысле, и невозможно отличить одну от другой с помощью любого критерия, основанного на внутреннем механическом эксперименте. Смысл последнего пункта заключается в том, что если, например, мы находимся в плавно движущемся самолете и проводим в нем эксперимент, то он даст в точности тот же результат, как если бы он был выполнен в наземной лаборатории.

Так как физических эффектов скорости не существует, и существуют только эффекты ускорения, то невозможно обнаружить скорость любого объекта с помощью внутреннего эксперимента. Скорость есть величина не абсолютная, но чисто относительная, тогда как ускорение абсолютно.

В дополнение к этим основным принципам можно установить простые математические правила преобразования, связывающие измерения, сделанные в одной системе отсчета, с измерениями, сделанными в другой, когда это потребуется, т. е. когда объект измерения находится вне этих обеих систем. При таких преобразованиях ускорение, естественно, сохраняется, так же как и время, которое в ньютоновской физике считается величиной универсальной и абсолютной.

2. Электромагнетизм и специальная теория относительности

В механике Ньютона скорость никогда не рассматривалась как нечто фундаментальное; действительно, она в определенном смысле произвольна. В любом поле сил, в любой мыслимой физической ситуации, можно приступить к рассмотрению явления в данный момент, произвольно задавая положения и скорости всех частиц. Их последующее поведение определяется законами механики. Однако в других отраслях физики, особенно в области электромагнетизма и связанных с нею областях оптики, существует некая фундаментальная по значению скорость — скорость света, которая должна быть независима от инерциальной системы отсчета, где она измеряется. Принятие этого факта и, следовательно, распространения принципа относительности Ньютона на электромагнитные явления известно как специальная теория относительности. На революционном характере этой теории постоянно делается ударение, однако часто упускают из виду, что содержащееся в ней подтверждение применимости ньютоновских идей не только к механике, но и к электромагнетизму есть просто распространение ньютоновского принципа относительности на всю физику. Итак, эта теория в некотором смысле глубоко консервативна; справедливость принципов, которые, как было установлено, имеют силу в механике, распространяется на всю физику. Специальная теория относительности неизбежно следует из самого утверждения, что единство физики — ее внутренняя основа, ибо было бы совершенно нетерпимым, если бы все инерциальные

системы, эквивалентные с механической точки зрения, были бы различимы посредством оптических измерений. Конечно кажется почти невероятным, что возможность такого неравноправия между механикой и электромагнетизмом считалась сама собой разумеющейся в XIX в.; в то время было нелегко решить, что важнее — универсальная справедливость ньютоновского принципа относительности или абсолютный характер времени, о котором мы упоминали выше.

Простой математический расчет показывает, что скорость света не может быть одинаковой во всех инерциальных системах отсчета, если сохранить предположение об универсальном характере времени. Поэтому необходимо отказаться от метафизической идеи об абсолютности времени и рассматривать время в физическом смысле как то, что можно измерять часами. В современной науке становится все более и более понятным, что беспредметно говорить о каких-либо величинах, пока не установлен способ их измерения. Антинаучно считать время единым, равномерно текущим, загадочно неизменным. Мы не можем также допускать, что в каком-то неясном смысле время, измеренное часами в одной системе отсчета, равно времени, измеренному в другой. Единственное, что можно утверждать, принимая принцип относительности Ньютона, называемый в применении ко всей физике специальным принципом относительности Эйнштейна, — это эквивалентность всех инерциальных систем. Итак, необходимо установить новые законы преобразований, основная черта которых заключается в том, что время связывается с пространством. Это свойство обычно понимается как четырехмерная природа пространства-времени. Хотя эту фразу иногда считают звучащей таинственно, идея ее совершенно ясна. Под трехмерной природой пространства подразумевается, что для определения положения тела необходимо сделать три независимых измерения, но их можно смешать при вращении координат. Эти измерения не являются в каком бы то ни было смысле абсолютными, хотя они позволяют определить величины, такие, как расстояние между двумя точками тела, не зависящие от того, под каким углом зрения их рассматривают. Под четырехмерной природой пространства-времени мы понимаем тот факт, что скорость

наблюдателя может привести к смешиванию временного интервала с пространственной протяженностью объекта как раз в таком же смысле. Существенное обстоятельство заключается в замечательном сходстве этого явления с тем, что происходит при вращении трех пространственных координат; точно так же, как некоторые величины (например, расстояние между двумя точками тела) не зависят от того, как мы их рассматриваем, так и некоторые типы измерений (а именно определение интервалов) не зависят от состояния движения наблюдателя. Нет необходимости обращаться здесь к бесчисленному множеству экспериментальных проверок специальной теории относительности или к ее хорошо известным достижениям, как, например, к установлению связи массы и энергии. Было бы, однако, полезно рассмотреть ее алгебраические возможности, вытекающие из четырехмерной природы пространства-времени. Существует несколько простых алгебраических структур, соответствующих пространству-времени, и этот факт обеспечивает возможность делать весьма важные заключения.

Мы знаем, что в обычном пространстве трех измерений возможность изменения положения наблюдателя уменьшает число допустимых физических законов. Можно, например, сказать, что сила, действующая на движущуюся положительно заряженную частицу со стороны магнитного поля, составляет правую тройку направлений со скоростью частицы и с направлением магнитного поля. Но нельзя сказать, что сила всегда направлена вправо от частицы, ибо такое утверждение имело бы различный смысл для разных наблюдателей.

Представим себе теперь тот период развития физики, когда были хорошо известны законы распространения света, что позволяло в принципе построить специальную теорию относительности, но когда законы электромагнетизма были еще известны очень плохо, а понимание электромагнитной природы света вообще отсутствовало.

Предположим, в частности, что магнетизм был совершенно неизвестен и что были открыты только два простейших закона электростатики. Иными словами, было известно: а) линии электрического поля создаются только электрическими зарядами, и это справедливо независимо

от того, движутся они или нет; б) электрическое поле консервативно (т. е. что если переместить заряд по замкнутому пути, то полная работа электрического поля будет равна нулю), но только когда оно не меняется во времени. Как подобная ситуация будет выглядеть с точки зрения теории относительности? В этой теории у нас есть пространственно четырех измерений и, следовательно, любая направленная величина (вектор) должна иметь четыре компонента, которые можно до некоторой степени преобразовать одна в другую посредством изменения скорости наблюдателя. Так, в механике импульс представляет собой три пространственных компонента такого рода, а энергия есть временная компонента. Во всех применениях специальной теории относительности оказывается, что временная компонента вектора связана с его пространственными компонентами.

Однако закон сохранения зарядов и свойств электрических силовых линий не подходит под эту схему. Этот закон не только подразумевает именно три пространственных компонента электрического поля, но его справедливость, даже когда заряды движутся, совершенно исключает существование временной компоненты электрического поля. Из этого следует, что электрическое поле не может иметь такую же простую алгебраическую структуру, какую образуют импульс и энергия частицы. Следовательно, необходимо обратиться к какой-то более сложной величине, а следующим по сложности после вектора является тензор.

В четырех измерениях тензор имеет шестнадцать компонент; однако число этих компонент может быть уменьшено из соображений симметрии. В особенно простом случае антисимметричного тензора число компонент уменьшается до шести, три из них образуют одну группу и три - другую; каждая группа преобразуется в другую через движение. Три компоненты первой группы могут быть отождествлены с тремя пространственными компонентами электрического поля и с математической точки зрения не могут иметь связанной с ними временной компоненты. Эти три компоненты антисимметричного тензора образуют наиболее простой набор с подобными свойствами. Иными связаны три другие компоненты, и поскольку они

появляются вследствие наличия скорости, то наш релятивист может заключить, что подобно тому, как покоящийся электрический заряд порождает электрическое поле, движущийся электрический заряд (электрический ток) должен порождать какой-то другой тип поля. Эту величину мы называем магнитным полем, и релятивист должен был прийти к выводу о его существовании из простых соображений симметрии. Более того, тот факт, что электростатическое поле консервативно, дает ему возможность сделать еще шаг вперед в установлении структуры электромагнитного поля, ибо он мог бы усмотреть возможность образования полного поля из четырехмерного вектора-потенциала. Затем, связав поле, полную структуру которого он смог установить из релятивистских соображений, с источниками поля (покоящимися и движущимися зарядами), он приходит к полному набору уравнений Максвелла, описывающих электромагнитное поле. Из этих уравнений он может затем заключить, что изменения электромагнитного поля будут распространяться со скоростью света. Для завершения своей системы уравнений он должен будет ввести предположение о причинности, состоящее в том, что информация об изменениях в системе передается во времени вперед, а не назад. Для него не составит труда установить, что свет представляет собой одну из форм этих электромагнитных возмущений, законы распространения которых он целиком получил из принципа относительности и из наиболее элементарных законов электростатического поля.

Здесь целесообразно коротко обсудить вопрос о том, что математик понимает под волнами. Он не обязательно имеет в виду периодический синусоидальный процесс; он просто имеет в виду нечто, способное распространяться. Таким образом, одна из существенных особенностей волн заключается в их способности переносить информацию. Именно через посредство волн приемник получает информацию о том, что происходит у передатчика. Изменения состояния передатчика распространяются в виде волн; идея информации (новостей) неразрывно связана с идеей волн, и это главное для их понимания. Вторая характерная особенность волн — это перенос ими энергии. Существует много форм передачи энергии, и будет полезно сначала

ла вспомнить о способе, которым энергия от электростанции по проводам передается потребителю. Здесь важно, что количество энергии, даваемое станцией, целиком зависит от того, сколько ее использует потребитель (если отвлечься от потерь при передаче, которые малы и в принципе могут быть сделаны пренебрежимыми). Однако в случае распространения волн имеет место совершенно другая ситуация. Радиопередатчик излучает энергию в пространство совершенно независимо от числа и расположения приемников. Количество испускаемой энергии совершенно не зависит от того, включают люди свои приемники или нет. Это удивительное свойство радиации в ряде отношений даже трудно понять, ибо что же происходит с испущенной энергией? Похоже на то, что она поглощается пространством на больших расстояниях. Существуют веские причины полагать, что вся система функционирует только потому, что все излучение где-то полностью поглощается (пусть на очень больших расстояниях) и, более того, что это тесно связано со строением нашей Вселенной, которая расширяется. Следовательно, здесь могут быть установлены две существенные характеристики волн, а именно что энергия испускается независимо от существования и расположения приемников и что волны могут переносить информацию.

3. Гравитация

Гравитация отличается от всех других видов сил тем свойством, открытым Галилеем, что все тела падают с одинаковым ускорением. Гравитационная сила пропорциональна массе тела, так что ускорение тела не зависит от массы. Все значение этого замечательного факта мы обсудим немного позже; здесь же можно сказать, что когда Ньютон формулировал свою теорию гравитации, он просто принял за аксиому, что гравитационная сила, действующая на тело, пропорциональна массе. Более того, он принял консервативный характер гравитационных сил и закон обратной пропорциональности силы квадрату расстояния. Наконец, он допустил, что свойство материи порождать гравитацию (быть источником гравитационного поля) также заключается в его массе — результат, безусловно сле-

дующий из его третьего закона о действии и противодействии. На базе этой ньютоновской формулировки гравитационной теории было сделано огромное количество работ. Солнечная система дала широкое поле приложений для применения ньютоновской теории гравитации и для проверки ее в мельчайших деталях в течение больших периодов времени.

Шестьдесят лет назад можно было утверждать, что ньютоновская теория гравитации является наиболее разумной и твердо установленной во всей физике. Затем совершенно неожиданно была выдвинута новая теория гравитации — общая теория относительности Эйнштейна, и вера в абсолютную справедливость теории Ньютона после незначительного сопротивления рухнула. Как же случилось, что столь хорошо обоснованная теория была отброшена и заменена другой, самая большая заслуга которой заключается в том, что она дала те же результаты, что и прежняя? Немногочисленные и незначительные пункты, в которых эти теории разошлись, были даже не особенно твердо установлены экспериментально. И все-таки основная концепция теории Ньютона была сочтена безнадежно несостоятельной, а современные работы базируются именно на общей теории относительности.

Существуют две причины этого заката ньютоновской картины мира, первая из которых связана со специальной теорией относительности. Выше уже было показано, как основные понятия оптики и электромагнитной теории вынудили нас отказаться от ньютоновской идеи о едином равномерно текущем времени и трехмерном пространстве и заменить ее идеей четырехмерного пространства-времени.

Ньютоновская гравитация не приспособлена к четырехмерному пространству-времени; она не имеет соответствующей алгебраической структуры. Это не было ясно раньше просто вследствие того, что все наши знания о гравитации получены из наблюдений довольно медленно движущихся тел, а для таких тел почти не существует разницы между пространством и временем Ньютона, с одной стороны, и пространством-временем специальной теории относительности — с другой. Тем не менее полное признание специальной теории относительности само по себе утверждает тот факт, что теория Ньютона не соответствует рамкам со-

временной физики и, следовательно, должна быть оставлена. Выбор теперь сильно ограничен, ибо число простых релятивистских теорий мало. Именно на этой стадии впервые возникает предположение о существовании гравитационных волн. Мы видели, как простые законы электростатики, в том числе закон обратной пропорциональности силы квадрату расстояния, неизбежно приводят в рамках пространства-времени специальной теории относительности к понятию электромагнитных волн. Стоит только решить, что гравитационная теория также должна быть релятивистской, как возникнет предположение, что здесь события должны развиваться аналогичным образом, т. е. коль скоро статическое гравитационное поле правильно описывается законом обратной пропорциональности силы квадрату расстояния, гравитационное поле быстро движущихся тел должно дать начало гравитационным волнам.

Вторая причина для отказа от ньютоновской теории — принцип Галилея — помогает определить, какая из нескольких возможных релятивистских теорий гравитации должна быть принята. В теории Ньютона тот факт, что гравитационная сила пропорциональна массе тела, на которое она действует, имеет не большее значение, чем, скажем, тот факт, что электростатическая сила пропорциональна заряду подвергающегося воздействию тела. Однако эта видимая аналогия массы с гравитационным полем довольно поверхностна.

Тела могут иметь любой заряд, который мы захотим им сообщить, масса же тела — его неотъемлемое свойство. Но существует такой вещи, как тело без массы; тел же без заряда сколько угодно. Это непосредственно касается первого закона Ньютона, основы ньютоновской механики, утверждающего, что тело, на которое не действуют силы, движется по прямой линии с постоянной скоростью. Каковы возможности проверить этот закон? Допустим, мы решили осуществить такой эксперимент, наблюдая движение подходящего тела. Чтобы проверить первый закон, необходимо убрать все силы, действующие на тело. Следовательно, прежде всего физик убедится, что тело не подержано связям, затем, что между телом и окружающей средой нет трения. После этого он выяснит, что тело лишено заряда, так что электрические силы отсутствуют, и т. д.

Таким образом, он может устранить все силы, действующие на тело, точнее, все силы, исключая гравитацию. Он не сможет избавиться тело от его массы, ибо ее отделить от тела не легче, чем человека от его собственной тени.

Ньютон думал, что сможет обойти эту трудность, указав что подвергаемое испытанию тело должно быть достаточно удалено от всех других тел, но это едва ли помогает делу. Проблема не только в том, что в каждой точке должно существовать равномерное прямолинейное движение, предписываемое первым законом Ньютона, но, как теперь стало хорошо известно, Вселенная везде заполнена материей, так что достаточно изолированной области вообще нигде не существует. Следовательно, мы должны заключить, что предложение Ньютона нереально. Основная предпосылка его заключается в том, что если тело движется равномерно, то нет оснований искать вызывающую движения силы. Их надо искать только тогда, когда движение тела отклоняется от равномерного. Однако эта аргументация отпадает, если пример Ньютона нереализуем и недоступен для проверки. Единственный выход заключается в том, чтобы принять за стандарт равномерного движения движение под влиянием гравитационного поля, другими словами, отвергнуть само понятие гравитации как силы.

Сила есть нечто, заставляющее материю отклоняться от ее равномерного движения; равномерно же движение по инерции под влиянием гравитации. Гравитация и инерция стали в некотором смысле едины; они образуют рельефы, по которым движется тело в отсутствие сил. Правда, чтобы включить в себя все сложные гравитационные явления, новое понятие инерциального движения должно быть бесконечно более сложным, чем движению по прямой линии с постоянной скоростью, как в примере Ньютона. Тем не менее, мы достигли гораздо более удовлетворительного положения вещей, ибо теперь должным образом учтен тот факт, что под влиянием гравитации все тела движутся одинаково и осуществимо новое стандартное (инерциальное) движение.

Что остается от гравитационного поля, когда оно рассматривается как исходная точка для преодоления стандарта инерциального движения? Единственное свойство, которое мы можем теперь обнаружить, — это его неодно-

родность, т. е. тот факт, что две соседние частицы падают не точно одинаковым образом, так как гравитационное поле меняется от точки к точке. Изучение относительного ускорения соседних частиц теперь служит для описания гравитационного поля, что и может быть непосредственно осуществлено в релятивистской форме. Более того, форма релятивистской теории гравитации теперь установлена: она должна быть такой, чтобы гравитация позволяла воспроизвести те же эффекты, что и инерция, поскольку они рассматриваются как единое свойство.

Напомним, что при использовании неинерциальных систем отсчета в ньютоновской теории появляются фиктивные силы, такие, как, например, центробежная. Отсюда следует, что описание гравитационного поля должно соответствовать сложности движений, обусловленной использованием произвольных систем отсчета и учетом фиктивных сил инерции, при этом возникающих. Оказывается, что на такой основе гравитация описывается симметричным тензором в пространстве-времени, т. е. величиной, имеющей десять независимых компонент. На самом деле этот тензор имеет особое значение; по существу он описывает саму природу пространства-времени. Свойства пространства естественно измерять при помощи свободно движущихся частиц или световых лучей, которые представляют собой предельную форму свободно движущихся частиц. Следовательно, новое основное инерциальное движение служит для описания самого пространства-времени. Оно наморяется не через понятие прямых линий, проходимых с постоянной скоростью, а в терминах свободного движения материи.

Высказанные положения составляют основу общей теории относительности Эйнштейна, и можно видеть, какой огромной убедительной силой она обладает. Ее основным является тот факт, что все тела падают одинаково быстро, а также что подверженность воздействию гравитации есть неотъемлемое свойство материи. Эта теория родилась сразу в рамках понятия пространства-времени и, следовательно, соответствует идям электромагнетизма и специальной теории относительности; но она, таким образом, является естественным преемником теории Ньютона. Из последней уравнения, определяющие способ, которым

исходная точка для преодоления стандарта инерциального движения? Единственное свойство, которое мы можем теперь обнаружить, — это его неодно-

материя порождает гравитационное поле, состоят из определенной линейной комбинации относительных ускорений соседних частиц — «лапласиана», приравненного плотности материи. Подобный путь в общей теории относительности приводит к так называемым уравнениям поля, в которых вновь используются линейные комбинации коэффициентов, определяющих относительное ускорение соседних частиц, приравненные к величинам, описывающим материальное содержание пространства. Возможно, это не единственный путь, но аргументация настолько убедительна, что трудно сомневаться в бесспорных преимуществах общей теории относительности как релятивистской формулировки гравитации, принимающей во внимание также тот факт, что все тела падают одинаково быстро. Более того, можно без особых трудностей показать, что для медленно движущихся тел общая теория относительности дает почти те же результаты, что и теория Ньютона; расхождения чрезвычайно малы. Одно из них относится к крайне малому смещению перигелия планеты Меркурий, где теория Ньютона не вполне соответствовала фактам, тогда как общая теория относительности дала точный результат. Два других расхождения связаны с вопросами распространения света. Одно из них можно усмотреть, исходя из самых фундаментальных принципов, но трудно наблюдать экспериментально, хотя совсем недавно это и удалось*. Другое расхождение касается действия гравитации на световой луч, и здесь результаты наблюдения вновь прекрасно согласуются с теорией относительности, которая предсказывает этот очень слабый эффект.

Подводя итоги, скажем, что мы вынуждены отвергнуть ньютоновскую гравитацию ввиду ее нерелятивистского характера. При попытке сформулировать релятивистскую теорию гравитации мы лицом к лицу сталкиваемся с необходимостью учитывать факт одинаково быстрого падения всех тел, что почти неизбежно приводит к теории Эйнштейна. С экспериментальной точки зрения эта теория идет дальше ньютоновской, хотя и не особенно далеко. Однако суть вышеизложенного заключается в том, что мы

* Имеются в виду опыты Паунда и Крэншоу по сдвигу частот γ -лучей в поле тяготения. — *Прим. ред.*

вынуждены принять общую теорию относительности скорее на основании выводов, вытекающих из других областей физики, чем исходя из ее согласия с небольшим числом экспериментальных наблюдений как раз в тех деталях, где имеются расхождения между теориями Ньютона и Эйнштейна. Нас приводит к новой теории принцип единства физики, который требует, чтобы гравитация, с одной стороны, и электромагнетизм и оптика, с другой, не принадлежали к разным типам пространства-времени.

4. Квантовая теория

Мы здесь лишь кратко остановимся на тех важных успехах, которые были достигнуты за последние пять — десять лет в понимании структуры атомов и ядер, а также поведения внутриатомных частиц. Хорошо известно, что область физики, трактующая эти вопросы, значительно отличается от физики больших (макроскопических) тел, ибо в принципе здесь уже нельзя более пренебрегать влиянием измерительного прибора на наблюдаемый объект.

Имея дело с самыми маленькими физическими объектами, нельзя прибегнуть к орудиям исследования, более тонким, чем сами объекты. Это вводит неопределенности и неточности, которые формулирует и описывает квантовая теория (квантовая механика), а первое применение она нашла при анализе движения электрона в поле заряженного ядра. Это поле является электромагнитным, но эффекты его заметны только как электростатические. Согласно фундаментальным положениям квантовой теории, само электростатическое поле не нуждается в квантовании главным образом потому, что оно неспособно передавать информацию: оно рассматривается просто как облако, окружающее центральное ядро. На этой ранней стадии развития теории рассматривалась неопределенность, возникающая из ограничения наблюдаемости при воздействии сил на тела. Только при рассмотрении реакций тел на воздействие известных сил учитывалась неопределенность, обусловленная ограничениями возможностей наблюдения.

Квантовая механика в самом строгом смысле слова достаточна для описания основных, особенностей атомных структур, так как рассматриваемое в этом случае поле яв-

ляется электростатическим, подчиняющимся закону обратной пропорциональности квадрату расстояния, и не нуждается в квантовании. Квантованию было принято только позднее в случае поля электромагнитного излучения, где оно привело к серьезным осложнениям и трудностям, которые не были преодолены вплоть до самого недавнего времени.

5. Гравитационные волны

Тот факт, что существует предел точности, который невозможно преодолеть при одновременном определении положения и импульса частицы, представляет собой фундаментальное требование квантовой теории. Гравитационное поле, создаваемое некоторым телом, становится заметным, только когда масса тела очень велика. С другой стороны, гравитационные эффекты аддитивны, т. е. половина массы вызывает половину гравитационного эффекта целой массы.

Если последовательно применять это правило (а доказательств, что этого нельзя делать, не существует), то должны существовать гравитационные поля, обусловленные даже внутриатомными частицами, такими, как протон, нейтрон или даже электрон. Конечно, эти гравитационные поля невероятно слабы, ибо малы массы частиц, и они целиком перекрываются электрическими полями, которые гораздо сильнее (примерно в 10^{39} раз). Тем не менее, если в принципе невозможно одновременно измерить положение и импульс частицы, должно быть также невозможно найти эти величины даже с помощью фактически точного измерения гравитационного поля. Гравитационное поле, следовательно, также должно быть проквантовано для согласования с остальной физикой. В этом требовании вновь проявляется принцип единства физики, хотя, поскольку дело касается реального измерения, мы, конечно, очень далеки от возможности проверить необходимость квантования. Тем не менее логически это никак не отражается на необходимости квантования гравитационного поля, которое следует осуществить, чтобы гарантировать применимость одних и тех же ограничений возможности наблюдения мельчайших частиц как в случае гравита-

онных, так и в случае всех других экспериментов. Однако необходимость выполнения этой трудной операции отпадает, если гравитационное поле представляет собой лишь облако вокруг частицы.

Как в квантовой теории нет необходимости квантовать электростатическое поле точечной частицы, подчиняющееся закону обратной пропорциональности квадрату расстояния, так, по-видимому, и в случае гравитационного поля не возникало бы необходимости в его квантовании, если бы оно было чисто продольным, подчиняющимся закону обратных квадратов. Если, однако, в случае гравитации существует поле излучения, то его тоже необходимо квантовать, как и поле электромагнитного излучения. Таким образом, мы с двух разных сторон приходим к вопросу о том, существуют ли гравитационные волны: исходя из аналогии с электромагнетизмом, где применение релятивистских принципов ведет от статических понятий к волновым полям, и из квантовой теории, требующей квантования гравитационного поля, если существуют гравитационные волны.

Наконец, существует просто естественное любопытство. Мы имеем удовлетворительную теорию гравитационного поля — теорию Эйнштейна — уже сорок лет. В течение этого времени было известно, что говорит эта теория о гравитационном поле быстро движущихся частиц, пусть даже это поле нельзя практически наблюдать в природе по причине, которая оказывается в конце концов совершенно случайной, а именно из-за отсутствия достаточно быстро ускоряющихся объектов с большой массой. Таким образом, требование единства физики вызывает интерес к проблеме существования таких волн, хотя их экспериментального обнаружения вряд ли можно ожидать в течение еще какого-то времени.

После того как задача поставлена, кажется несколько неожиданным, что так трудно получить ответ, однако причины этого в значительной мере обусловлены математической стороной дела. Уравнения общей теории относительности, за исключением простейших случаев, исключительно сложны и трудны для расшифровки. Более того, их структура обладает некоторой специфической физической особенностью. Вследствие объединения инерции

и гравитации они допускают использование любой системы отсчета, а выбрать систему отсчета, никак не нарушая свойства гибкости пространства-времени, являющегося столь существенной особенностью теории, далеко не просто. Использовался ряд приближенных методов, из которых по крайней мере некоторые довольно спорны. Однако в этой области за последние годы достигнут заметный прогресс и получен ряд результатов.

Прежде всего, как можно генерировать гравитационные волны? Простейшая идея, которая приходит на ум, связана с распространением гравитационных изменений; она может дать формулировку вопроса. Например, если Солнце неожиданно прекратит свое существование, как скоро после этого Земля покинет свою орбиту? Однако этот вопрос не имеет смысла. В законы гравитации входит и закон сохранения материи, поэтому в рамках гравитационной теории Солнце не может исчезнуть. Далее, можно задать вопрос: что произойдет, если Солнце, вместо того чтобы исчезнуть, неожиданно сдвинется под прямым углом к плоскости земной орбиты? Сколько времени пройдет, прежде чем следствия этого обнаружат себя? Вновь вопрос лишен смысла, так как законы гравитации утверждают и сохранение импульса; следовательно, Солнце не может сдвинуться в сторону. Существуют, однако, гравитационные изменения, которые допустимы. Солнце могло бы вдруг превратиться в вытянутый или сплюснутый эллипсоид, и такое изменение, несомненно, повлияло бы на земную орбиту. Солнце могло бы разорваться на две половины, разлетающиеся в противоположных направлениях. Все это вполне мыслимые возможности, и любая теория должна, по крайней мере в принципе, ясно указывать, что в таком случае произойдет.

Оказывается, что скорость распространения гравитационной информации равна скорости света; поскольку это заложено в структуре пространства-времени, то результат ни в коей мере не является неожиданным. Повсюду в физике передача информации неразрывно связана с передачей энергии, хотя и не существует простого правила, определяющего количество энергии, которое требуется для передачи данного количества информации.

Исследуя поставленный выше вопрос, релятивист бе-

рет тело, окруженное пустым пространством, и спрашивает, как изменения формы тела повлияют на его массу. Изменения формы предполагают изменение гравитационного поля и, таким образом, с необходимостью вызывают также распространение информации. Но наиболее удобная мера энергии тела — это его масса; итак, грубо говоря, вопрос заключается в том, будет ли тело излучать массу при изменении своей формы.

Чтобы сформулировать этот вопрос строго, недостаточно потребовать, чтобы пространство, окружающее тело, было пустым, что в теории поля означает отсутствие не только корпускулярной материи, но и всех полей, кроме гравитационного. Однако если существуют гравитационные волны, переносящие энергию, то эти волны могут не только порождаться телом и покидать его, но также приходиться извне с больших расстояний к этому телу и, таким образом, передавать ему энергию. Чтобы исключить эти приходящие волны, к требованию пустоты пространства необходимо добавить «условие исходящего излучения». Это условие тесно связано с выполнением принципа причинности, именно с тем, что эффекты изменения формы должны происходить только после того, как изменение уже произошло. Условие исходящего излучения также исключает существование падающих волн, специально подобранных в соответствии с изменениями формы тела, которые можно рассматривать как волны, вызванные самими изменениями формы, но распространяющиеся назад во времени. Таким образом, это условие исключает не только неограниченный приток энергии, но и нарушения наших понятий причинности. Формулировка удобных условий этого типа является нелегким делом, и надо считать весьма отчаянным, что в последнее время была доказана эквивалентность трех различных формулировок, по крайней мере для одного важного случая.

Связанный с предыдущим вопрос касается происхождения информации, распространяемой уходящими волнами. Как случается, что изолированное тело изменяет форму, особенно когда оно было изолировано так долго, что окружающее его гравитационное поле не содержит следов воспоминаний того, что имел место процесс помещения тела в данную точку? Заметим, что изменения должны быть в

некотором роде неожиданными, так чтобы волны действительно переносили информацию. Простейшее устройство можно представить себе в виде бомбы замедленного действия с очень медленно горящим запалом, который в достаточной мере несовершенен, так что момент его срабатывания нельзя предсказать. Таким образом можно удовлетворить всем условиям рассматриваемой задачи.

* Математические результаты решения пока еще удручающе неполны. Не доказана даже возможность добиться большего, чем разработать некоторые приближенные методы, достоверность которых не всегда бесспорна. Один из этих методов крайне длинен и громоздок, а применимость его ограничена специальным случаем. В другом методе, столь же громоздком, существуют некоторые сомнения относительно однозначности формулировки условий, которым необходимо удовлетворить на больших расстояниях. Третий метод, самый короткий из трех, ограничивается исключительно случаем поля, удаленного от источника. В этом последнем методе серьезные затруднения при удовлетворении всем условиям на больших расстояниях от источника отсутствуют, но он не позволяет определить, какой тип движения источника порождает данное поле.

Тем не менее некоторые ответы были однозначно установлены и можно сформулировать по крайней мере несколько дальнейших вопросов. Так, например, установлено, что если некоторая система, находившаяся вначале в покое, претерпевает какие-то изменения формы и затем снова становится статической, то ее масса в конечном состоянии меньше, чем в начальном, на величину, пропорциональную квадрату изменения поля и просуммированную по всему периоду изменения. На начальное и конечное состояния накладывается требование статичности ввиду того, что только статические поля до конца понятны и допускают однозначное определение массы системы. Таким образом, было установлено, что система может излучать часть своей массы, хотя это только всего лишь сопутствующий эффект второго порядка при изменении формы, а не основная причина излучения, как это оказалось бы в гипотетическом случае исчезновения Солнца.

По структуре гравитационные волны должны быть полностью поперечными. Таким образом, если волна конеч-

ной длительности встречается со скоплением частиц, которые до этого покоились друг относительно друга, то после прохождения волны не возникает относительного движения частиц вдоль направления распространения волны. В перпендикулярном направлении частицы будут расходиться; в другом, составляющем прямые углы с первым и с направлением распространения волны, они будут сближаться друг с другом. На больших расстояниях от источника ограниченная часть волны является почти плоской, и плоские гравитационные волны хорошо изучены. Несмотря на сложность описывающих их уравнений, они распространяются без изменения формы, или без дисперсии. В этом они сходны с электромагнитными волнами (которые, однако, подчиняются правилам линейной суперпозиции, чего нельзя сказать относительно гравитационных волн, описываемых нелинейными уравнениями) и отличаются от звуковых волн, которые образуют ударные волны. Постоянство формы, несомненно, связано с поперечным характером волн.

Можно, кроме того, обдумать, хотя бы в принципе, конструкцию приемника гравитационных волн. Вообразим себе две массивные сферы, которые могут скользить по крепкому стержню, но скрепленные с помощью пружины на некотором расстоянии друг от друга. Если волна приходит под прямым углом к стержню, то она заставит сферы двигаться относительно друг друга как частицы в рассмотренном выше скоплении. Это должно вызвать относительное движение между сферами и стержнем и, следовательно, нагревание за счет трения. Некоторая часть энергии волны превратится в тепло, которое является локализованной энергией; таким образом будет зарегистрирован прием волны. Сам отклик приемной системы (на приход волны) вызывает вторичное излучение, и следовательно, одним приемником из данной волны может быть поглощено лишь ограниченное количество энергии. Чтобы это количество энергии оказалось наибольшим из возможных, движение сфер не должно быть ни слишком большим, ни слишком малым, и, следовательно, понятия импеданса и согласования становятся применимыми к случаю гравитации аналогично тому, как это было в случае электромагнитных явлений.

Гравитационное поле на больших расстояниях от источника может меняться особыми широко различающимися способами, не вызывая тем не менее излучения; это обстоятельство наводит на интереснейший вопрос. Ни одно из таких изменений не может начаться или кончиться без появления излучения. Какие же типы движения источников могут быть причиной подобных изменений, не вызывающих излучения? Современные методы дают весьма мало указаний, однако каждое из двух следующих противоречащих друг другу рассуждений по-своему убедительно.

Согласно одному из них, отсутствие излучения, несмотря на движение источника, обусловлено отсутствием ускорения частиц, составляющих источник. Это согласуется как с соображениями по аналогии с электромагнитным излучением, так и с выводами первого порядка одного из приближенных методов, но ни один из этих аргументов не является решающим. Противоположное рассуждение подчеркивает, что отсутствие ускорения в теории гравитации несущественно, так как здесь естественные орбиты частиц — это не пути неускоренного движения, а траектории свободного падения под влиянием гравитации.

С этой точки зрения источником неизлучающих изменений, по-видимому, является пылевое облако, так как в нем каждая частица движется свободно. Но если пылевое облако не излучает, то представляется неправдоподобным, чтобы можно излучать пассивное твердое тело; в противоположность этому бомба замедленного действия, являющаяся моделью излучателя, в высшей степени активна. Или, с более математической точки зрения, соотношение, связывающее давление и плотность, не зависит от времени в пылевом облаке или в упругом твердом теле, но зависит от времени в бомбе замедленного действия. Если в какой-либо форме имеет место внутреннее трение — неидеальная упругость, вязкость и т. д., то это соотношение зависит от направления времени, и происходящие процессы будут необратимыми. Поэтому большую привлекательность приобретает предположение, что одни лишь обратимые изменения источников поля на больших расстояниях порождают важный класс полей, зависящих от времени, но не являющихся полями излучения. Однако до сих пор эта догадка совершенно не доказана. Если это правильно, то

Вселенная содержит значительно меньше гравитационного излучения, чем могло бы быть в противном случае. Солнечная система излучала бы около одного киловатта энергии на гравитационных волнах, порожденных всеми ускорениями, и лишь доли милливатта, если бы к излучению вели только необратимые процессы, такие, как трение за счет морских приливов. Рассмотренный вопрос чрезвычайно увлекателен, но, по-видимому, не существует простого пути найти на него ответ.

Наконец, можно коротко остановиться на другой нерешенной проблеме, проблеме применимости принципа Гюйгенса к гравитационным волнам. Все уравнения волнового типа запрещают передачу любого возмущения со скоростью, превосходящей характеристическую, но только некоторые из них требуют, чтобы все возмущения обязательно распространялись именно с этой скоростью. Так, обычное уравнение звуковых волн малой амплитуды показывает, что в случае сферических и плоских звуковых волн все возмущения распространяется со скоростью звука; после прохождения короткого импульса среда снова целиком покоится. Однако в случае цилиндрических звуковых волн, в то время как частицы перед фронтом волны покоятся, за фронтом существует возмущение, так как часть энергии движется со скоростями, меньшими скорости звука. Таким образом, принцип Гюйгенса, согласно которому все возмущение распространяется с характеристической скоростью, выполняется для плоской и сферической звуковых волн, но не выполняется для цилиндрической. В случае гравитационных волн известно, что принцип Гюйгенса применим к плоским волнам и неприменим к цилиндрическим, но физически наиболее важный случай сферических волн (излучение изолированной системы) по чисто математическим причинам совершенно неясен. Решение этой проблемы прольет свет на много других неясностей в рассматриваемом вопросе.

Мы еще довольно далеки от действительного понимания гравитационных волн и еще дальше от их квантования; но некоторый прогресс достигнут, и мы, таким образом, уже ближе к возможности доказать полное единство физики.

Оглавление

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие	7
1. В чем и как ограничены наши физические теории	9
2. Относительность, ее мифы и предрассудки	23
3. Тяготение	52
4. Происхождение инерции и Вселенная	66
Литература для дальнейшего чтения	79
Дополнение. Гравитационные волны	80

Г. Бонди

ГИПОТЕЗЫ И МИФЫ В ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Редактор *Э. А. Медушевская*. Художник *В. А. Медников*. Художественный редактор *В. М. Варлашин*. Технический редактор *В. И. Резник*. Корректор *Л. В. Байкова*.

Сдано в набор 16/VI—1971 г. Подписано к печати 1/XI—1971 г. Бумага № 1.
84×108^{1/32}—1,63 б. л. Печ. усл. 5,46. Уч.-изд. л. 5,10. Изд. № 27/6338.
Цена 26 коп. Зак. 405.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР. Ярославль, ул. Свободы, 97.