

Рёю Утияма К ЧЕМУ ПРИШЛА ФИЗИКА



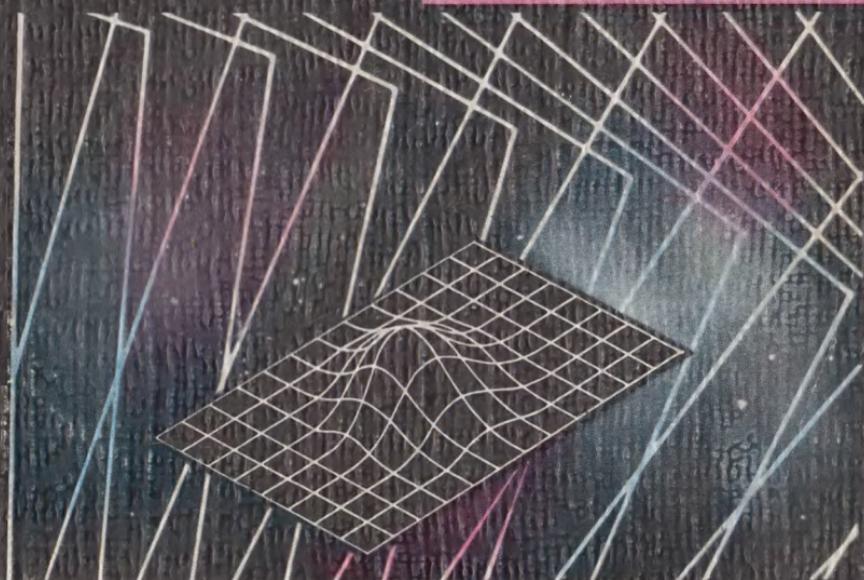
Издательство
Знания

ПЕРЕВОДНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Рёю Утияма

От теории
относительности
к теории калибровочных
полей

К ЧЕМУ ПРИШЛА ФИЗИКА



物理学はどこまで進んだか

— 相対論からゲージ論へ —

内山龍雄著

Рёю Утияма
**К ЧЕМУ ПРИШЛА
ФИЗИКА**



物理学はどこまで進んだか

—相対論からゲージ論へ—

内山龍雄著

物理学はどこまで進んだか

— 相対論からゲージ論へ —

内山龍雄 著



岩波現代選書 JYS

Рёю Утияма

***К ЧЕМУ ПРИШЛА
ФИЗИКА***

*От теории относительности
к теории калибровочных полей*

*Перевод
с японского
И.И.ИВАНЧИКА*

**Издательство „Знание“
Москва 1986**

ББК 22.3
У84

Предисловие академика В. Л. ГИНЗБУРГА.

Перевод, примечания и комментарии кандидата физико-математических наук И. И. И в а н ч и к а.

Утияма Р.

У 84 К чему пришла физика (От теории относительности к теории калибровочных полей). Пер. с япон. Предисл. акад. В. Л. Гинзбурга. — М.: Знание, 1986. — 224 с.

50 к.

93 000 экз.

Как пишет автор в предисловии, он намеревался «познакомить читателя только с двумя самыми характерными учениями физики XX в теории относительности и квантовой механикой», проследить «путь квантовых и релятивистских идей от их зарождения до нынешнего состояния». Под «нынешним состоянием» Р. Утияма, известный японский физик-теоретик, имеет в виду теорию калибровочных полей, в разработке которой он принимал самое активное участие.

у $\frac{1704010000-035}{073(02)-86}$ 19—86

ББК 22.3
53

© Иванами сётэн, 1983 г.
© Издательство «Знание», 1986 г.
Перевод, комментарии, примечания.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачи научно-популярной литературы хорошо известны: удовлетворить любопытство учащейся молодежи и людей любого возраста, но не специалистов в обсуждаемой области, скажем, в физике или биологии. Кроме того, когда школьник или студент младших курсов прочтет научно-популярную книгу, относящуюся к его будущей специальности или близкому к ней научному направлению, он обычно очень облегчает себе овладение предметом уже на высоком уровне. Для достижения этих целей нужно по любому вопросу иметь несколько книг, конечно хороших книг, но разных. Дело здесь в том, что одни читатели лучше воспринимают, скажем, геометрические образы, в то время как другим понятнее простые алгебраические выкладки и т. д. и т. п. Да и авторы оригинальных книг, в том числе и научно-популярных, все пишут неодинаково, делают различные акценты и тоже привержены кто к геометрическим образам, а кто к каким-то иным.

Эти замечания, конечно, в достаточной мере тривиальны. Но, как мне кажется, стоило их сделать, чтобы дать совет (в первую очередь, конечно, совсем молодым людям). Если вы читаете популярную книгу и не удовлетворены — многое остается непонятным и неясным, — посмотрите другую книжку на ту же тему. Быть может, у вас и у ее автора более близкий тип мышления или просто другому автору лучше удалось изложить вопрос. Кроме того, некоторые проблемы и теории особенно трудно поддаются популярному изложению, сопровождаемому, как правило, требованием ограничиваться лишь самой примитивной математикой, находящейся в пределах лишь нескольких классов школы. Иногда это последнее требование, конечно, оправдано, но далеко не всегда. Школьники старших классов, не говоря уже о студентах, знакомы с математическим анализом. В то же время имен-

но их, а не детей, интересует теория относительности и квантовая теория. Впрочем, эти великие теории XX в. заслуженно привлекают внимание и вполне взрослых людей, желающих избежать использования даже алгебры. О таких читателях тоже нужно думать, и мы опять приходим к тому же выводу: необходимо иметь научно-популярные книги разных типов, степени сложности, с различными подходами и т. д.

Не стану скрывать, что такое довольно длинное начало понадобилось мне для того, чтобы пояснить, почему представляется целесообразным появление русского перевода книги Р. Утиямы. Ее автор — японский физик-теоретик, имеющий, как говорится, имя в научном мире. Основное научное достижение автора связано с развитием теории так называемых калибровочных полей (простейшим примером которых является хорошо всем известное электромагнитное поле), в частности в применении к гравитационному полю. И вот, насколько я себе представляю, автор захотел в популярной форме осветить и свою работу, хотя речь идет о достаточно сложных и не привычных для предполагаемых читателей вопросах. Несомненно, такой эксперимент не был бы оправдан в популярной книге, если бы калибровочные поля в настоящее время не находились в центре внимания теоретической физики. Сейчас, однако, положение именно такое: с анализом калибровочных полей связаны поистине замечательные достижения (в первую очередь единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий).

Коротко говоря, книга Р. Утиямы весьма нестандартна, необычна в ряде отношений. Последнее относится и к стилю изложения, как-то отражающему специфику далекой от нас японской культуры. Тут и «бог», роль которого, по-видимому, отводится читателю. Тут и объявление Эйнштейна мессией, и пояснение, касающееся планов вступления автора в брак. Наконец, последняя глава книжки под названием «Горькие сожаления» в значительной мере носит автобиографический характер.

Отмеченные пассажи в книге Р. Утиямы имеют, по сути дела, совершенно второстепенное значение, а их необычная для нас форма чаще всего лишь отражает своеобразие культурных традиций далекой страны. Кроме того, И. И. Иванчик, выполнив-

ший столь трудный перевод на высоком уровне (об этом в большой мере можно судить и не зная японского языка), снабдил текст целым рядом примечаний. Последние помогут правильно понять автора, допускающего иногда неточности или двусмысленности, практически неизбежные при популярном изложении.

Резюмируя, я думаю, что книгу Р. Утиямы многие прочтут с интересом и с пользой для себя.

Академик

В. Л. Гинзбург

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Вопрос, поставленный в названии моей книги, может показаться чересчур претенциозным. Ведь физика не исчерпывается проблемами элементарных частиц и теорией относительности: наука эта огромна, и я затрудняюсь даже перечислить все ее разделы, не говоря уже о том, чтобы толково и интересно рассказать о достижениях на каждом из направлений исследования. Моя цель скромнее: познакомить читателя только с двумя самыми характерными учениями физики XX в.: теорией относительности и квантовой механикой. Конечно, они — лишь часть современной физики, но эта часть — ее фундамент. Поэтому я и подумал, что не навлеку на себя упреков в недобросовестности, если в заглавии книги, проследивающей путь квантовых и релятивистских идей от их зарождения до нынешнего состояния, вынесу вопрос: «К чему пришла физика?»

По современным представлениям вещество нашей Вселенной построено из фундаментальных частиц, число типов которых невелико и которые взаимодействуют между собой силами четырех видов.

От частицы к частице силы передаются специальными носителями взаимодействия — калибровочными полями. Каждая из четырех разновидностей сил (фундаментальных взаимодействий) имеет свои особые свойства, и на первый взгляд не ясно, есть ли между ними что-то общее. Однако в последнее время все настойчивее высказывается предположение, что поля, передающие взаимодействие между частицами, принадлежат одному и тому же семейству. Идея о близком родстве калибровочных полей лежит в основе разрабатываемой сейчас теории объединения взаимодействий. Такова современная физическая картина мира.

Каким образом развитие физических идей в XX в. привело к этой картине? Что такое калибро-

вочные поля? Я постарался просто и понятно ответить на эти вопросы.

Некоторое время назад издательство «Иванами сѣтѣн» выпустило мою книгу «Теория относительности», во вводных главах которой суть теории объяснена без сложных математических формул. Большой успех «Теории относительности» (книга разошлась мгновенно) показал, что мои объяснения понравились читателям [1]*.

Теперь я еще сильнее упростил математическую сторону изложения. Не пугайтесь, если кое-где в данной книге вы заметите нечто, напоминающее математические формулы: вы наверняка без труда поймете эти места. Чтобы осилить книгу, не требуется особой математической подготовки. Достаточно знать четыре арифметических действия.

Признаюсь, я много потрудился над текстом, так как эта книга по содержанию шире, чем «Теория относительности», и написана проще, а несложные и тем не менее убедительные объяснения давать нелегко. Теперь, когда тяжелая работа уже позади, я испытываю некоторое удовлетворение, хотя и понимаю, что какой бы шедевр ни создал автор, все его усилия пропадут даром, если читатель не проявит необходимого терпения и не дочитает книгу до конца.

Как правило, с возрастом у людей ослабевает любовь к чтению, они становятся менее терпимыми, утрачивают способность внимательно выслушивать собеседника и вникать в смысл сказанного. Я и сам не раз убеждался, что людям старше шестидесяти лет — как мужчинам, так и женщинам — ничто не нравится. Все это понятно, но именно поэтому я сознательно стремился сделать свою книгу интересной, увлекательной и понятной также и для читателей, перешагнувших рубеж пенсионного возраста.

Ход мысли я старался представить настолько ясно и живо, чтобы даже самый взыскательный читатель охотно следовал аргументации и соглашался с ней. Надеюсь, мне удалось избежать логических скачков и мнимых объяснений; думаю, что это под-

* Здесь и далее в квадратных скобках номер примечания или комментария переводчика в конце книги. — Прим. ред.

твердят и физики — специалисты в данной области, если им случится прочесть мою книгу. В последнее время стали появляться популярные изложения сущности теории калибровочных полей, но я решаюсь утверждать, что книг, равных по своим достоинствам моей, нигде в мире издано не было. Похоже, я так расхвастался, что читатель наверняка обрадуется, если ему удастся заметить в моем труде хоть какие-то недостатки.

26 января 1983 г.

Рёю УТИЯМА

ГЛАВА 1 О ПОНЯТИИ ПОЛЯ

Наша Вселенная представляет собой скопление вещества, под которым имеются в виду всевозможные комбинации мельчайших корпускул, так называемых элементарных частиц. Частицы — материал, из которого построена Вселенная. Если его должным образом связать, получатся атомы, молекулы, разнообразные физические тела, химические соединения и биологические ткани; из него же в конечном счете состоят гигантские звезды и далекие туманности. Но каким образом связываются друг с другом элементарные частицы? Что такое «силы связи»? Какой путь пришлось пройти физике, прежде чем ей удалось достичь современного понимания природы этих таинственных сил? В своей книге я постараюсь понятно и просто ответить на эти вопросы.

Итак, моя цель — объяснить широкому кругу читателей физику XX в.: теорию относительности, квантовую механику, основанную на них теорию элементарных частиц и, наконец, теорию калибровочных полей. Это значит, в соответствии с вынесенным на обложку подзаголовком, что мою книгу можно рассматривать как занимательную повесть о пути от теории относительности к теории калибровочных полей — одной из основ современной физики; можно сказать еще, что я даю введение в физику XX в.

Силы и закон инерции

Прежде чем отправиться в наше путешествие, поясним, что вообще понимают в физике под словом «сила». Силой называют причину изменения состояния движения физических тел. Движение тела характеризуют быстротой перемещения

и направлением, в котором тело движется, то есть скоростью движения. Поэтому сила является причиной изменения скорости тел. Такое определение тесно связано с эмпирически установленным законом, по которому *тело движется в одном и том же направлении с неизменной быстротой, если на него не действует сила*. В частности, *если на покоящееся тело не действует сила, то тело сколь угодно долго пребывает в состоянии покоя*. Сказанное относится ко всем без исключения телам во Вселенной. Свойство тел сохранять состояние своего движения в отсутствие сил называют инертностью, а об утверждении, набранном курсивом, говорят, что это — закон инерции, или первый закон Ньютона.

Хотя закон инерции и называют законом природы, но это очень необычный закон: нередки случаи, когда он просто не верен. Чтобы разобраться в вопросе, рассмотрим пример. Представим себе покоящийся на поверхности Земли дом. Для объяснения его неподвижности естественно принять, что, хотя он и притягивается Землей, притяжение уравновешивается направленной вверх силой давления почвы на фундамент, которая не позволяет дому погружаться вниз. Таким образом, действующие на дом внешние силы взаимно компенсируются и в целом равны нулю.

Присевший отдохнуть путник, взглянув на дом, скажет, что дом покоится; наблюдение путника согласуется с законом инерции. Но если путник бредет заплетающимся шагом, качаясь из стороны в сторону, то он увидит, что дом тоже качается, — для идущего так путника закон инерции не верен!

При наблюдении природных явлений, например регистрации положений и скоростей движущихся тел, во избежание разнобоя надо заранее условиться, от какого стандартного состояния производить отсчет. Так, например, значения высот какой-нибудь

горы будут разные при отсчете от поверхности степи в предгорье и от уровня моря. Точно так же неподвижный наблюдатель и наблюдатель, сидящий в проносящемся мимо экспрессе, припишут разные значения скорости одному и тому же физическому телу.

Допустим, что все наблюдения выполнены на приборах, установленных внутри сарайчика на даче. Физик назовет сарайчик вместе с оборудованием системой отсчета. Пользуясь этим термином, мы можем сказать, что наблюдение дома из системы отсчета, покоящейся относительно Земли, подтверждает закон инерции, а наблюдение того же дома из системы отсчета, расположенной на петляющем из стороны в сторону автомобиле, показывает, что закон инерции не действует. Те системы отсчета, в которых закон инерции справедлив, называют инерциальными; пример инерциальной системы — система отсчета, покоящаяся относительно Земли [2]. А система отсчета, укрепленная на автомобиле, управляемом нетвердой рукой, неинерциальна.

Итак, ясно, что закон инерции «усеян исключениями», это чрезвычайно «разболтанный» закон: каждый раз приходится решать, верен ли в данном случае закон инерции или нет.

Иначе говоря, закон инерции следует понимать как принципиальное утверждение о существовании в нашем мире инерциальных систем отсчета, то есть таких счастливых наблюдателей, которым удастся своими глазами увидеть явления, описываемые при формулировке этого закона. Данное выше определение силы пригодно только для наблюдателей в инерциальных системах. Очень важно также заметить, что и второй закон Ньютона, о котором мы еще будем говорить, тоже верен лишь в инерциальных системах отсчета.

Возможно, некоторым покажется, что существование инерциальных систем отсчета самоочевидно, но если как следует вдуматься, каждый поймет, что не так-то просто решить, действительно ли инерциальна система отсчета, избранная им самим для наблюдений. Таким образом, закон инерции далеко не тривиален. Чтобы выразить его, надо было логически осмыслить огромный эмпирический материал и прийти к идеализированному абстрактному понятию об инерциальной системе отсчета.

Поначалу я намеревался ограничиться приведенным объяснением закона инерции, но потом понял, что оно недостаточно, и решил добавить еще одно, может быть, немного утомительное пояснение.

Я сказал, что *сила есть причина изменения скорости движения тела*. Попробуем, пользуясь этим определением и не выходя за рамки механики, по изменению скорости решить, равна ли нулю действующая на тело сила. Согласно сказанному нам придется понаблюдать за движением этого тела в инерциальной системе отсчета. А для проверки инерциальности надо посмотреть, покоится ли специальное пробное тело, про которое мы знаем, что на него не действует никакая сила. Но как убедиться в равенстве нулю силы, приложенной к пробному телу? В рамках чистой механики при решении последнего вопроса мы возвращаемся к исходному пункту рассуждения, то есть попадаем в порочный круг.

Тем самым я хочу подчеркнуть, что в узких рамках так называемых механических физических явлений невозможно построить логически замкнутую, окончательную теорию сил и инерции. Для выхода из порочного круга при решении вопроса о равенстве нулю приложенной к пробному телу силы надо привлечь знания из других, немеханических, областей физики. Например, можно сказать, что пробное тело достаточно удалено от источников всевозможных

помех: заряженных или намагниченных тел, сильных источников излучений и т. п.; но тогда исчезновение прилагаемой к пробному телу внешней силы обосновывается нашим знанием законов электромагнетизма. Этим пояснением я и закончу рассмотрение определения силы и закона инерции в механике.

Второй закон механики

Выше мы занимались случаем, когда на тела не действуют никакие силы. Ответ на вопрос о том, как изменяется состояние движения тел под действием сил, дает второй закон Ньютона. Для его формулировки вводят понятие ускорения, под которым понимают отношение изменения скорости к интервалу времени, за который это изменение произошло, и говорят: ускорение тела пропорционально действующей на него силе. Понятно, что при помощи этого закона можно вычислять величины действующих на данное тело сил, если предварительно измерить ускорения, сообщаемые силами телу.

Разумеется, за одинаковые промежутки времени одна и та же сила разным телам сообщит разные приращения скорости. Из повседневного опыта мы знаем, что тело тем труднее ускорить, чем оно тяжелее, и наоборот, чем тело легче, тем проще его разогнать. О телах, с трудом поддающихся ускорению, то есть неохотно изменяющих свою скорость, в физике говорят, что эти тела обладают большой инертностью. В быту то же самое выражают такими, например, словами, как «ленивый», «тяжелый на подъем». Чтобы охарактеризовать величину этого свойства в применении к физическим телам, вводят термин «инертная масса». Чем больше инертная масса тела, тем сильнее его инертность, оно как бы более лениво, менее охотно изменяет свою скорость под действием силы.

Теперь мы можем сформулировать второй закон Ньютона несколько строже: *ускорение, сообщаемое телу силой, прямо пропорционально ее величине и обратно пропорционально инертной массе тела.*

Его запись в виде математической формулы

$$(\text{ускорение}) = (\text{сила}) : (\text{инертная масса})$$

ясно показывает, что при одной и той же силе ускорение тела тем меньше, чем больше его инертная масса. Если у нас есть какой-либо независимый способ определения силы, то формула второго закона Ньютона позволяет подсчитать инертную массу тела. Таким образом, эту формулу можно толковать как определение инертной массы.

Из опыта всем известно, что инертная масса увеличивается при возрастании тяжести тела. Венгерский физик Этвеш точными измерениями доказал, что инертная масса тела прямо пропорциональна его весу. Поэтому в дальнейшем вместо слов «инертная масса» мы будем часто говорить «вес» или «тяжесть».

Тяжелая и инертная масса

Под весом тела (его тяжестью) имеют в виду силу, с которой взятое в руки тело давит на ладони. Иначе говоря, тяжесть — это сила, с которой тело притягивается Землей. Строго говоря, тяжесть тела и сила его притяжения Землей — не одно и то же, но поскольку эти величины взаимно пропорциональны, в данной книге мы будем обозначать их одним и тем же словом. Тяжесть измеряют при помощи весов.

Выше указывалось, что инертная масса характеризует степень «лености» тела или его «нежелания подвинуться». Таким образом, в сущности, тяжесть и инертность — совершенно разные понятия. Однако по неизвестной нам причине — может быть,

случайно — оказалось, что их величины пропорциональны друг другу. Это не теоретический домысел, а эмпирический факт. Измерения Этвеша показали универсальный характер пропорциональности между инертной и тяжелой массой.

Поясним, что имеется в виду под универсальностью. Пусть единицей веса служит грамм, а единица инертной массы выбрана произвольно. Назовем ее «ин». Предположим, что кусок золота, весящий один грамм, содержит три ина инертной массы. Тогда, по смыслу прямой пропорциональности, кусок золота весом 5 граммов будет содержать 15 инов инертной массы, а инертную массу любого куска золота можно получить, умножая его вес, выраженный в граммах, на три.

Возьмем теперь вместо золота серебро. На какое число нужно умножить вес серебра в граммах, чтобы получить его инертную массу? Абстрактно говоря, для серебра коэффициент перевода тяжелой массы в инертную вовсе не обязан равняться трем, как в случае с золотом. Но измерения Этвеша показали, что коэффициент перевода совершенно одинаков для любых веществ. В этом заключается универсальность прямой пропорциональности инертной и тяжелой масс.

Из универсальности следует, что указанный коэффициент перевода можно сделать равным единице, если должным образом подобрать единицы измерения. Тогда число, выражающее вес любого тела в граммах, будет давать также инертную массу этого тела. Грамм обычно определяют как вес одного кубического сантиметра воды. Если заключенную в одном кубическом сантиметре воды инертную массу назвать «ином», то число, выражающее вес воды в граммах, одновременно будет давать ее инертную массу в инах.

Поскольку, согласно опытам Этвеша, коэффици-

ент перевода граммов в ины равен единице не только для воды, но и для веществ любой природы, при сделанном определении инертной массы нет необходимости различать инертность и вес: то и другое можно выражать одними и теми же числами в грамах.

Ньютонова теория не объясняет причину пропорциональности инертной и тяжелой масс. Эйнштейн вместо объяснения причины этого эффекта истолковал его как указание на истинную природу тяготения и положил в основу созданной им общей теории относительности.

Ньютон, добавив к рассмотренным выше двум законам движения третий, называемый законом о равенстве сил действия и противодействия, построил механику, явившуюся исторически первой физической теорией. Эту механику, основу современной технической цивилизации, называют ньютоновой. Она послужила образцом или исходным пунктом для построения теорий во многих других областях физики.

Дальнодействие и близкодействие

Посмотрим, каким образом действуют силы. Для нанесения удара противнику перчатка боксера обязательно должна коснуться тела партнера: с какой бы силой боксер ни взмахнул рукой, при громахе его соперник ничего не ощутит. В этом примере для нас важно то, что сила передается от тела к телу путем соприкосновения.

Но бывают случаи, когда для передачи сил соприкосновения не требуется. Таковы электрические и магнитные силы, а также силы притяжения небесных тел — Земли, Солнца и т. п. (раньше силы, действующие между небесными телами, называли силами всемирного тяготения, но теперь предпочитают гово-

речь просто о притяжении, или силе тяжести, гравитации). Приливы и отливы у морских берегов — следствие влияния лунного притяжения на Землю. Вращение Земли, Марса, Венеры и других планет вокруг Солнца обусловлено притяжением центрального светила, которое не позволяет планетам слишком удалиться.

Рассмотрим далее два тела A и B , подвешенные на нитках к горизонтальному диэлектрическому стержню под колоколом вакуумного насоса. Если телу A сообщен положительный, а телу B — отрицательный электрический заряд, то нитки не будут свисать вертикально вниз, а застынут в наклонном положении, при котором тела A и B приближены друг к другу (рис. 1). В вакууме под колоколом нет среды, которая передавала бы электрическую силу от тела A к B . Тем не менее одного взгляда на рисунок достаточно, чтобы понять: тела притягиваются друг к другу. Читатель, конечно, знает, что похожим образом действует также и магнитная сила.

Существование в природе силы тяжести, электрической и магнитной сил очень затрудняет попытки найти единый закон передачи силы от тела к телу. Как ясно из рассмотренных примеров, электрическая, магнитная и гравитационная силы для своей передачи не нуждаются в какой-либо промежуточной среде, а действуют непосредственно на удаленного

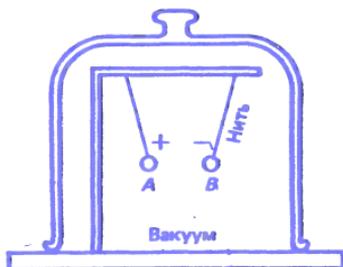


Рис. 1. Демонстрация далекодействующих сил электрического происхождения

партнера, поэтому их называют силами дальнего действия (взаимодействие на расстоянии). Напротив, обычные силы, с которыми люди постоянно сталкиваются в повседневной жизни, такие, как сила удара молотка по гвоздю, подъемная сила самолета и т. п., получили общее название сил ближнего действия (взаимодействие через соприкосновение). Если отвлечься от трех (представляющих исключение) сил дальнего действия, то все остальные обычно встречающиеся силы (их явное большинство) являются ближнедействующими. Поэтому предпринимались настойчивые попытки как-то включить три исключительные силы в семейство сил ближнего действия. В результате была изобретена удивительная среда, получившая название «эфир».

Эфир

Обычно идею эфира связывают с именем голландского физика Гюйгенса. Но в действительности о *веществе*, которое потом получило название *эфир*, впервые заговорил английский ученый Гук, современник Ньютона. Гук независимо от Ньютона и несколько раньше выдвинул идею всемирного тяготения [3]. Имя Гука известно также в связи с его исследованиями упругих тел и работами во многих других областях физики. Однако в истории физики научные заслуги Гука в отличие от заслуг Ньютона сильно недооцениваются, и это достойно сожаления.

Стимулом для разработки теории эфира послужили исследования природы света. Были выдвинуты две противоборствующие концепции: корпускулярная теория, по которой свет представляет собой поток мельчайших частиц, несущихся с огромной скоростью, и волновая теория, утверждающая, что свет — это некие волны. Ньютон считал правильной

корпускулярную, а Гук — волновую картину света. Для корпускулярной теории тяжелым ударом явилось открытие в 1665 г. явления дифракции, то есть отклонения света в область тени за предметом, стоящим на пути светового пучка*. А волновая теория в то время не могла объяснить прямолинейного распространения света в вакууме.

Отличительная особенность волнового движения состоит в том, что колебания, возникающие в каком-либо одном месте среды, распространяются в окружающие это место участки. Так, при волновом движении поверхности воды ее вертикальные колебания занимают все более широкую область. Звуковые волны — не что иное, как распространение небольших колебаний воздуха. Но тогда, может быть, и световые волны тоже являются колебаниями некоторого вещества? Впервые о возможности существования такого еще неизвестного вещества заговорил Гук, а впоследствии идею Гука поддержал Гюйгенс. Гюйгенс же дал этому веществу название «эфир».

Мы видим, как на ночном небе сверкают звезды. Значит, свет, излученный в далеком прошлом звездой, преодолев за долгое время необозримое пустое пространство, разделяющее звезду и Землю, достиг Земли. Поскольку, согласно Гуку и Гюйгенсу, свет — это колебания эфира, надо допустить (ведь мы видим звезды!), что эфир пронизывает вакуум и вообще заполняет все уголки Вселенной. Итак, даже вакуум заполнен эфиром; следовательно, эфир — это вещество, еще более разреженное и легкое, чем газ, и совершенно недоступное для наших пяти органов чувств.

Изучение оптических явлений много дало для по-

* 1665 г. — год опубликования сочинения Франческо Гримальди (1618—1663), открывшего явление дифракции. — *Прим. ред.*

нимания природы света, в частности, волновую теорию сильно поддержали опыты по интерференции. Но открытие поперечности световых волн привело к необходимости приписать эфиру взаимоисключающие свойства. В самом деле, мы согласились, что эфир надо представлять себе как газообразное вещество, настолько разреженное, что оно недоступно для восприятия; но в таком веществе согласно физической теории упругих тел совершенно не могут распространяться поперечные волны.

В первой половине XIX в. стала развиваться электродинамика. Изучаемые в ней силы нового типа — электрические и магнитные — поначалу тоже пытались понять на чисто механической основе, то есть истолковать их как разновидность упругих сил. Например, взаимное сближение тел *A* и *B*, показанное на рис. 1, объясняли тем, что пространство между *A* и *B* заполнено не видимым глазу резиноподобным веществом, деформация которого вызывает притяжение тела *A* к телу *B*. Естественно, что это вещество отождествили с эфиром. Физики того времени ожидали, что по отношению к магнитным силам и силам всемирного тяготения эфир будет играть такую же роль, какую ему приписывали в теории электричества.

Но по мере развития исследований электромагнитных явлений выяснялось, что эфир надо наделять все более сложными, прямо-таки чудесными свойствами, и постепенно пришли к мысли, что, во-первых, такой эфир не может существовать, а во-вторых, вообще нет нужды рассматривать подобное вещество.

Были выполнены разнообразные эксперименты, ставившие под вопрос само существование эфира. Наиболее определенно отрицал эфир опыт Майкельсона и Морли. Существованию эфира противоречила также основная идея теории относительности. И на-

конец, поняли, что вопрос о дальнодействии можно удовлетворительно решить без привлечения столь странного вещества, как эфир, на основе нового понятия — поля. О поле пойдет речь через один параграф, а в следующем параграфе мы кратко ознакомимся с результатами опыта Майкельсона—Морли.

Опыт Майкельсона—Морли

Гук и Гюйгенс ввели идею эфира потому, что им хотелось интерпретировать свет как бегущие по эфиру волны. Согласно опыту скорость света в вакууме составляет около 300 000 километров в секунду (ниже мы обозначаем эту величину буквой c). С точки зрения эфирной теории для наблюдателя A , покоящегося относительно эфира (рис. 2), скорость света равна c . Естественно принять, что Земля движется относительно эфира в некотором направлении со скоростью, величину которой обозначим v . Пусть направление скорости Земли параллельно направлению распространяющегося в эфире луча света L_1 и антипараллельно лучу L_2 . Покоящийся относительно Земли наблюдатель B обнаружит, что скорости лучей отличаются от c : скорость луча L_1 равна $c - v$, а луча L_2 — $c + v$. Итак, для земного наблюдателя скорость света в зависимости от направления распространения принимает самые различные значения. Постоянное, не зависящее от направления распространения значение c земной наблюдатель регистрирует только при условии, что Земля покоится относительно эфира.

Исходя из таких соображений, Майкельсон и Морли попытались выяснить, как именно изменяется скорость света на Земле при изменении направления его распространения. Против ожиданий они обнаружили отсутствие какой бы то ни было зави-

симости. Значит, Земля покоится относительно эфира? Иными словами, результат опыта означал, что сквозь эфир движутся все звезды и остальные небесные тела вне Земли: воистину второе пришествие геоцентризма! Подобное «самоуверенное», разумеется, не свойственно не только нам, землянам XX в., им не страдали и ученые конца XIX в., поэтому геоцентрическая интерпретация опыта Майкельсона и Морли неприемлема.

Но если признавать существование эфира, то в выводе о неподвижности Земли не содержится ошибки: это ясно уже из рис. 2 и подтверждается интерпретацией света как распространяющихся по эфиру волн. Итак, причина неприятности — вещество, называемое эфиром. Достаточно просто сказать: эфира нет — и затруднение исчезает. Тогда, правда, вопрос о природе света и проблема дальнего действия возвращаются к исходному пункту. Но здесь нам помогает новое понятие — *поле* и новая теоретическая схема — *теория относительности*. О них мы поговорим в следующих параграфах.

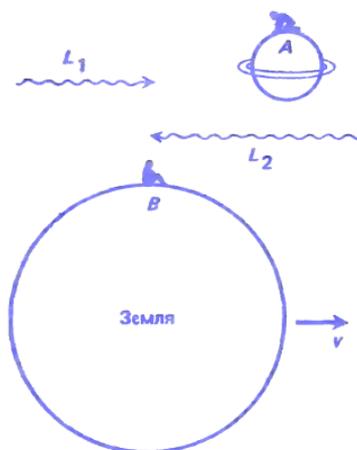


Рис. 2. Наблюдение света из системы отсчета, движущейся относительно эфира

Электрическое поле

В качестве простого примера рассмотрим случай, когда в вакууме укреплен маленький шарик A , которому сообщен положительный электрический заряд. Если к нему поднести другой отрицательно заряженный шарик B , окажется, что A притягивает B . Если же шарик B положительно заряжен, то B , наоборот, отталкивается от A . Говорят, что между A и B действует электрическая сила. Когда заряд шарика A равен нулю, на заряженный шарик B со стороны A не действует никакая сила [4]. Следовательно, при сообщении шарiku A электрического заряда окружающее A пространство по сравнению со случаем, когда A не заряжен, приобретает какие-то новые, странные свойства. Говоря «странные», я преувеличиваю, но суть дела в том, что какие бы новые заряженные тела мы ни подносили к заряженному шарiku A , все они испытывают вблизи A либо притяжение, либо отталкивание. Область с такими свойствами называют *областью существования электрического поля, создаваемого заряженным телом A* , а о заряде тела A говорят как об источнике этого поля.

Обозначим r расстояние от источника поля A до заряженного тела B . Электрическая сила F , действующая между A и B , прямо пропорциональна величинам их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Последнее означает, что при увеличении расстояния r в два, три раза сила умножается на коэффициенты $1/2^2 = 1/4$, $1/3^2 = 1/9$, то есть быстро ослабевает. График зависимости F от r показан на рис. 3.

Электрическое поле тела A существует в той области, где проявляется влияние создаваемой A электрической силы. В какую бы точку этой области ни поместить заряженное тело B , оно будет либо

притягиваться к A , либо отталкиваться в зависимости от того, отрицателен или положителен заряд B . Будучи обратно пропорциональной квадрату расстояния, эта сила быстро убывает при удалении B от A . Электрическое поле является как бы средой, заполняющей окружающее A пространство, в каждой точке которой проявляется способность к действию на помещенное в эту точку заряженное тело. Понимание поля как среды решает проблему дальнего действия электрической силы.

В самом деле, если учесть наличие поля, то окажется, что сила, действующая на заряженное тело B , помещенное в любую точку поля P , не передается мгновенно от A к B : на B непосредственно действует поле, существующее в точке P . Иначе говоря, B испытывает действие электрической силы при соприкосновении с окружающим тело B электрическим полем. Таким образом, электрическое поле интерпретируется как среда, передающая электрическую силу в точки пространства, окружающего источник поля.

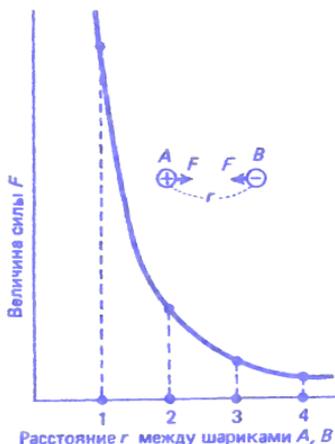


Рис. 3. График зависимости силы электрического взаимодействия маленьких шариков от расстояния между ними

У читателя, который знает о вопросе только то, что прочел до сих пор в данной книге, может возникнуть сомнение: не тождественны ли с точки зрения выполняемых функций поле и эфир? Не сводится ли их различие к различию названий? Чем поле лучше эфира? Такие сомнения законны. Чтобы рассеять их, отметим, что между полем и эфиром есть одна существенная разница. Эфир понимался как разновидность вещества, и в конце концов выяснилось, что вещество с требуемыми для эфира свойствами существовать не может. А электрическое поле — не вещество [5]. В этом коренное различие между эфиром и полем.

При объяснении понятия электрического поля я подчеркивал, что каждая точка области его существования обладает специфической способностью к действию на помещенное в нее заряженное тело. Создается эта способность, несомненно, источником поля A . А что представляет собой среда, на каждую точку которой указанная способность как бы наклеена? Мы уже знаем, что электрическое поле может существовать также и в вакууме, где полностью отсутствует любое вещество. В теории эфира носителем рассматриваемой способности являлось невидимое вещество — эфир. Признавая существование поля, мы отказываемся думать о такого рода странном веществе. Но что же тогда является носителем обсуждаемой здесь способности? Ответ состоит в том, что партнером, получающим от A эту специфическую способность, служит само пространство. В прошлом, говоря о носителе того или иного свойства, люди обязательно представляли себе то или иное вещество. Но, может быть, не запрещено иметь свойства или способности также и пространству — вместилецу всех физических тел и арене для всех физических процессов? Раньше, говоря о пространстве, всегда имели в виду протяженность, не имею-

щую никаких свойств или способностей, за исключением одной: полностью охватывать все помещенные в него физические тела. Но думать так — ошибка.

Пространство

Абстрактное математическое пространство впервые было построено древнегреческим математиком Евклидом, который из всех свойств окружающего нас реального пространства учел только его способность охватывать реальные физические тела. Свойства математических пространств изучает наука геометрия. Идеальное пространство, придуманное Евклидом, называют евклидовым пространством, а математическую дисциплину, изучающую его свойства и законы, — евклидовой геометрией. Евклидово пространство — это математическое пространство, в котором действуют законы евклидовой геометрии.

С евклидовой геометрией все знакомятся в средней школе. Ее характерные особенности передаются высказываниями типа «сумма внутренних углов треугольника равна 180° » и «на плоскости через точку, лежащую вне данной прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной». В структуре математических пространств не нашли отражения такие свойства реального физического пространства, как его способность обеспечивать распространение света или передавать электрическую и магнитную силы. Но так как даже рассмотренные математиками пространства имеют богатую геометрическую структуру, не будет удивительным, если окажется, что послужившее для них образцом реальное пространство обнаружит не учтенные математиками свойства.

Можно сказать, что евклидово пространство — портрет реального, и этот портрет станет только

совершеннее, если мы будем чаще исправлять его, соотнося с оригиналом. И все же это не более чем портрет. Что бы ни говорить, а реальное пространство, несомненно, сложнее построенных математиками упрощенных и идеализированных пространств. Большая сложность реального пространства проявляется, в частности, в специфической способности к действию на электрические заряды, сообщаемой ему источником электрического поля A .

В теории эфира носителем такой способности было вещество — эфир. После того как носителем способности к действию на электрические заряды стали считать не эфир, а само пространство, которое не является веществом, были отброшены жесткие ограничения эфирной теории, неразумно требовавшей сведения электрических свойств к упругости вещества. Появилась возможность более свободного обсуждения электрических, а позднее и магнитных явлений, и физики смогли отойти от сложившегося ранее стереотипа — приписывать любые свойства лишь веществу (а не пространству как таковому).

Если принять, что пустое пространство имеет электрическую способность (потенцию), то немедленно возникает вопрос: как она распределяется среди точек пространства, то есть как зависит величина этой потенции в каждой точке от величины и знака электрического заряда и от положения источника поля A ? Без ответа на подобные вопросы утверждения о наличии у пространства тех или иных свойств лишаются конкретного содержания. Основанная на понятии поля теория электромагнетизма была по-настоящему завершена только после того, как подобные задачи о распределении поля научились решать без ссылок на свойства упругого вещества — эфира.

Математическое описание структуры поля и его

связи с источниками впервые дано английским ученым Максвеллом. Поэтому законы электромагнетизма называют уравнениями Максвелла, а разработанный Максвеллом формальный (математический) аппарат получил название теории поля.

Электромагнитное поле и свет

На электрическое поле похоже поле постоянного магнита, возникающее в окрестности магнитного полюса. Например, магнитное поле вблизи северного магнитного полюса N напоминает электрическое поле в окрестности положительно заряженного шарика A . Вообще магнитным полем называют область пространства, каждой точке которого некоторый магнитный полюс, например магнитный полюс N , сообщил способность к действию на внесенные в эту точку другие магнитные полюса. Величина магнитного поля, так же как и электрического, ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника поля. Источниками магнитного поля, кроме магнитных полюсов, могут являться движущиеся электрические заряды (электрический ток). Хорошим примером источника второго вида является электромагнит.

Наоборот, при движении постоянного магнита возникает электрическое поле. Так, простой генератор тока — это устройство, в котором электрическое поле образуется при быстром вращении постоянного магнита. Электрическое и магнитное поля не просто взаимно похожи, они настолько тесно связаны друг с другом, что их объединяют в одно общее электромагнитное поле. Законы электромагнитного поля выражают связь полей друг с другом и с источниками поля: электрическими зарядами, магнитными полюсами и электрическими токами. Обычно, говоря об уравнениях Максвелла, имеют в виду за-

коны электромагнитного поля, которое понимается как объединение электрического и магнитного полей.

Представим себе колеблющийся на поверхности воды поплавок. Его вертикальные колебания передаются воде и начинают распространяться во все стороны по ее поверхности. Аналогичное явление происходит и в случае электрического поля. Изменения величины электрического заряда источника A вызывают изменения «электрической потенции» во всех точках окружающего источник A пространства, то есть возникают усиления и ослабления электрического поля, окружающего A , постепенно распространяющиеся от ближайших к A областей на удаленные участки пространства. Вместо колебаний величины неподвижного в пространстве электрического заряда можно рассматривать движение заряда, неизменного по величине. Например, колебания заряженного шарика A вблизи некоторого положения влияют на электрическое поле в его окрестности, подобно тому как колебания поплавка вызывают вертикальные колебания окружающей воды. Разбегание в стороны от источника A вызванных им колебаний электрического поля называют явлением распространения электрических волн.

Заметим, однако, что при колебаниях шарика A происходит возвратное движение электрического заряда; значит, протекает электрический ток. Аналогично увеличение или уменьшение величины электрического заряда при неподвижном источнике A может происходить только за счет втекания в A или вытекания из A электрического тока. Таким образом, в обоих случаях вблизи шарика A течет переменный электрический ток, возбуждающий, как мы уже знаем, вокруг A переменное магнитное поле, которое, так же как в рассмотренном выше примере с электрическим полем, будет распространяться в ок-

ружающем A пространстве: по пространству побегут магнитные волны. Мы видим, следовательно, что электрические и магнитные волны не могут существовать изолированно друг от друга: в пространстве вокруг источника A они распространяются совместно. Поэтому говорят не об отдельных электрических и магнитных волнах, а о единой электромагнитной волне. На вопросы о том, каким образом переменные источники A излучают электромагнитные волны и с какой скоростью те распространяются, отвечают законы электромагнетизма — уравнения Максвелла, из которых следует, что скорость распространения электромагнитных волн (c) равна 300 000 километров в секунду и что эти волны всегда поперечны. Поэтому естественно думать, что свет — одна из разновидностей электромагнитных волн. Такую идею выдвинул в 1873 г. создатель теории электромагнетизма Максвелл. В настоящее время в истинности электромагнитной теории света убеждено все человечество.

Кроме света, существует много других разновидностей электромагнитных волн. Напомним, что в общем случае длиной волны называют расстояние между ее соседними горбами. К электромагнитным относятся радиоволны (длина волны порядка нескольких сот метров), видимый свет (длина волны от 8 до 4 сотых долей сантиметра), рентгеновские лучи (длина волны около одной стомиллионной доли сантиметра) и т. п. Все электромагнитные волны, представляющие собой процесс распространения колебаний во времени величины электромагнитного поля, движутся не по фантастическому веществу — эфиру, а бегут в вакууме, где вообще отсутствует какое бы то ни было вещество. Эти волны могут существовать только благодаря специфической способности пустого пространства к действию на электрические заряды и токи.

Вводя понятия поля тяжести (гравитационного поля), аналогичное понятию электромагнитного поля, можно включить в семейство близкодействующих сил также и силу тяжести. Это значит, что каждая точка пространства, окружающего, например, Солнце, получает от него новую специфическую способность к действию на тела, обладающие тяжестью: если в любую точку окружающего Солнца пространства поместить тяжелое тело (например, Землю), то последнее станет притягиваться к Солнцу. Область пространства, в каждой точке которого имеется такая способность, называют гравитационным полем Солнца.

На этом мы заканчиваем объяснение понятия поля. Возможно, что это понятие, означающее существование у пустого, ничего не содержащего пространства способности к действию на источники электромагнитного или гравитационного полей, окажется трудным для восприятия и усвоения [6]. Если это так, то читатель вместо пустого пространства может представлять себе пространство, наполненное невидимой желеобразной средой — эфиром, если, конечно, думать о таком эфире будет для него легче, чем о поле. Надо только твердо помнить, что этому эфиру лучше не приписывать свойств реального вещества. Тогда не будет никакой ошибки, если вместо поля представлять себе студневидный эфир.

ГЛАВА 2 ЧАСТНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принцип относительности Галилея

Какова абсолютная скорость Земли? Желание узнать ответ на этот вопрос привело к созданию теории относительности (так называли первый вариант этой теории. Впоследствии, когда Эйнштейн построил новую более общую теорию, первый вариант стали называть частной, а второй вариант — общей теорией относительности. В своей книге я для первого варианта теории с самого начала употребляю название *частная теория относительности*). Поясним сначала, что имеется в виду под абсолютной скоростью.

Мы уже знаем, что если в некоторой системе отсчета выполняются законы ньютоновой механики, в том числе закон инерции, то эта система отсчета инерциальна. Покоящаяся на поверхности Земли система отсчета является инерциальной потому, что в ней неподвижны стоящие на Земле здания [7]. Точно так же инерциальна система отсчета, находящаяся в поезде, идущем с постоянной по величине и направлению скоростью, поскольку упомянутые здания в этой системе отсчета все движутся с одной и той же постоянной скоростью, противоположной по направлению скорости поезда.

Из приведенных примеров понятно, что система отсчета, движущаяся относительно некоторой инерциальной системы отсчета с постоянной по величине и направлению скоростью, сама инерциальна. Таким образом, инерциальных систем отсчета бесконечно много.

Если ограничиться чисто механическими явле-

ниями, то все инерциальные системы эквивалентны друг другу, ни одна из них не лучше другой, так как любое механическое явление можно наблюдать из какой угодно инерциальной системы отсчета и во всех инерциальных системах ньютоновские законы механики выражаются одинаковым образом. Иначе говоря, если из некоторой инерциальной системы отсчета S_1 пересечь в другую инерциальную систему S_2 , то не получится, что какое-то механическое явление произошло в S_1 и не произошло в S_2 и при пересадке из S_1 в S_2 не придется изменять или исправлять законы механического движения тел. Это утверждение составляет содержание принципа относительности Галилея.

Напротив, наблюдатель, находящийся в неинерциальной системе отсчета, например в автомобиле, двигающемся зигзагами, обнаружит, что открывающиеся его взгляду явления не подчиняются законам ньютоновой механики, которые в данном случае нужно исправить, чтобы учесть зигзагообразное движение автомобиля. Необходимость таких обременительных исправлений показывает, что вообще говоря, неинерциальные системы «хуже» инерциальных.

Сказанное относится лишь к чисто механическим явлениям, то есть таким, при наблюдении которых интересуются только ответом на вопрос, как те или иные тела изменяют свое движение под действием внешних сил. Ситуация меняется при учете немеханических явлений, например оптических, электрических или магнитных. Так, согласно уравнениям Максвелла скорость света c в вакууме равна 300 000 километров в секунду. Это утверждение — закон, подтверждаемый также и экспериментально.

Опыт, показавший, что в согласии с уравнениями Максвелла скорость света равна c , выполнен в системе отсчета S_1 , покоящейся относительно Земли. Если это же наблюдение повторить в другой

инерциальной системе S_2 , например в поезде, движущемся с постоянной по величине и направлению скоростью, то (по Галилею) для скорости света должен получиться результат, отличающийся от c . Следовательно, уравнения Максвелла, выполняющиеся в S_1 , должны как-то измениться при переходе к S_2 . В этом смысле система S_2 «хуже» системы S_1 . Более того, скорость света должна отличаться от c в любой другой инерциальной системе, движущейся относительно системы S_1 ; значит уравнения Максвелла придется исправлять по-своему для каждой движущейся относительно S_1 инерциальной системы. Таким образом, при учете оптических и электромагнитных явлений оказывается, что все инерциальные системы отсчета за исключением тех, которые покоятся относительно системы отсчета S_1 , надо забраковать.

Вывод об исключительном месте Земли (системы S_1) был бы чересчур самонадеянным. Скорее, мы на Земле не занимаем столь привилегированного положения. Но где же тогда находится та исключительная инерциальная система отсчета, в которой верны законы электромагнетизма? Такую гипотетическую исключительную систему отсчета назвали в свое время абсолютной системой. Если покоящаяся относительно Земли система отсчета S_1 не абсолютна, то спрашивается: с какой скоростью и в каком направлении она движется относительно абсолютной системы отсчета? Вообще для любого тела величину и направление его скорости, регистрируемые из абсолютной системы отсчета, в то время называли абсолютной скоростью этого тела. Для жителей Земли было, конечно, очень интересно узнать, какова абсолютная скорость нашей планеты.

Абсолютная система отсчета

Какая инерциальная система отсчета может претендовать на роль абсолютной? В свое время была популярна следующая модель такой системы.

Представим себе Вселенную в целом: невообразимо огромное скопление вещества, включающее все звезды, туманности и т. п. Вне этого гигантского объединения вещество вообще должно отсутствовать; значит, на него не действуют внешние силы.

Обозначим G центр тяжести такой Вселенной и вообразим, что в G возведены буддийские пагоды, на перекрестье которых в позе лотоса восседает невозмутимый наблюдатель, естественно, убежденный, что точка G под его чреслами неподвижна. Его взору открывается комариная пляска звезд, туманностей и т. п. внутри вселенной, но он видит, что Вселенная как целое остается неподвижной. Следовательно, система отсчета, закрепленная в G , инерциальна.

Вспомним, что по теории эфира Вселенная полностью погружена в огромное «эфирное море». Значит, центр тяжести Вселенной G неподвижен относительно этого моря и при наблюдении из системы отсчета S_G скорость света независимо от направления его распространения равна c . Иначе говоря, при наблюдении из S_G справедливы уравнения Максвелла, то есть система отсчета S_G абсолютна. Следовательно, абсолютная скорость Земли — не что иное, как ее скорость относительно эфира.

Мы можем теперь воспользоваться результатом предыдущей главы, в которой показано, что для определения скорости Земли относительно эфира надо измерять зависимость величины скорости света на Земле от направления распространения света. Как ясно из рис. 2, максимальное значение наблюдаемой на Земле скорости света равно

$c + v$, а минимальное $c - v$. Отсюда находим величину абсолютной скорости Земли v , ее направление совпадает с направлением, в котором скорость света на Земле минимальна*.

В двух предыдущих абзацах мы ссылались на теорию эфира, но если признавать существование абсолютной инерциальной системы отсчета, в которой одновременно верны как ньютонова механика, так и максвеллова электродинамика, то даже без ссылок на эфир указанным выше методом можно изменить абсолютную скорость Земли.

Опыт Майкельсона — Морли

В конце XIX в. было выполнено много экспериментов, основанных на изложенных выше соображениях. Среди них наиболее известен опыт Майкельсона и Морли. О его результате мы уже кратко говорили в предыдущей главе. Здесь мы обсудим опыт Майкельсона и Морли снова, на этот раз подробнее.

Этот опыт сначала в 1881 г. был выполнен Майкельсоном в одиночку, а затем повторен с участием Морли в 1887 г. В обоих случаях была применена L -образная установка, схема которой показана на рис. 4. На биссектрисе прямого угла M_1OM_2 располагалось полупрозрачное зеркало M_0 : половину падавшего на него света зеркало M_0 пропуска-

* Земля вращается вокруг Солнца. Поэтому при наблюдении из S_G Земля не движется с постоянной скоростью вдоль прямой линии; значит, находящаяся на Земле система отсчета S_1 не инерциальна. Но за небольшой промежуток времени Земля не успевает заметно изменить величину и направление своей скорости, и в течение этого короткого интервала систему отсчета S_1 можно приближенно считать инерциальной. Тогда при наблюдении из S_G величина v будет иметь смысл скорости системы S_1 в течение указанного короткого интервала. — *Прим. авт.*

ло, а половину отражало. Оба плеча OM_1 и OM_2 L -образной установки имели одинаковую длину; на концах плеч в точках M_1 и M_2 располагались зеркала, полностью отражавшие к точке O весь падавший на них свет.

Пусть Земля движется сквозь покоящееся эфирное море со скоростью v , направление которой показано стрелкой, изображенной на рис. 4, и пусть для простоты плечо OM_1 параллельно направлению скорости Земли, а плечо OM_2 — перпендикулярно этому направлению. Свет от источника S , попадая в точку O полупрозрачного зеркала M_0 , разделяется на два пучка L_1 и L_2 . Пучок L_1 пропускается зеркалом M_0 , распространяется в прежнем направлении, полностью отражается зеркалом M_1 к точке O и, отражаясь от зеркала M_0 , попадает в интерферометр. Пучок L_2 отражается от зеркала M_0 , распространяется перпендикулярно направлению скорости Земли, полностью отражается зеркалом M_2 к точке O , пропускается зеркалом M_0 и тоже попадает в интерферометр. Таким образом, ис-

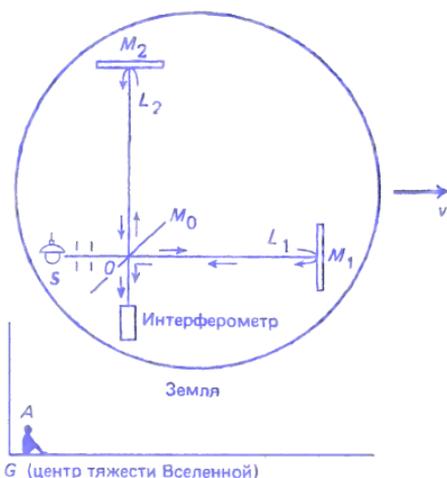


Рис. 4. Схема опыта Майкельсона—Морли

G (центр тяжести Вселенной)

пущенный источником S свет сначала разделяется на два пучка L_1 и L_2 , а затем эти пучки вновь объединяются в интерферометре. Но поскольку пучки L_1 и L_2 проходят разные пути, они попадают в интерферометр не в одно и то же время. Рассмотрим причину этого различия.

Так как длины плеч установки совпадают, оба пучка света L_1 и L_2 с точки зрения земного наблюдателя прошли одинаковые пути, но затратили на их прохождение разное время, ибо согласно эфирной теории скорости распространения пучков на этих путях различались. При движении от O к M_1 пучок L_1 имел скорость $c-v$, а в обратном направлении — скорость $c+v$. Скорость пучка L_2 связана с c и v более сложно.

С точки зрения наблюдателя A , покоящегося относительно эфирного моря, дело выглядит несколько проще: скорость пучков света L_1 и L_2 одинакова, а различаются пройденные пучками пути (из-за движения установки относительно эфира). Расчет показывает, что пучок L_1 проходит более длинный путь. В результате оказывается, что моменты прихода пучков в точку O чуть-чуть различаются. Цель опыта Майкельсона как раз и состояла в том, чтобы уловить эту незначительную разницу при помощи интерферометра. Понятно, что если Земля покоится относительно эфира, то никакой разницы наблюдаться не должно.

Поскольку направление абсолютной скорости Земли заранее не известно, сделанное на рис. 4 допущение о параллельности плеча OM_1 и направлении абсолютного движения Земли может быть неверным. Чтобы исключить связанную с этим ошибку, Майкельсон поместил установку на горизонтальный стол и поворачивал ее относительно стен лаборатории на любые углы вплоть до 360° . Тем не менее никакого относительного запаздывания пучков L_1

и L_2 обнаружено не было. Значит, в соответствии с первоначальным рассуждением надо сделать вывод, что Земля покоится относительно эфира.

Гипотеза Лоренца о сокращении масштабов

Понятно, что с таким заключением трудно согласиться. И нашлись люди, заявившие, что результат опыта Майкельсона вовсе не означает равенства нулю абсолютной скорости Земли: Земля движется сквозь эфир с ненулевой скоростью, но обнаружить это движение в опыте Майкельсона невозможно.

В рассуждениях Майкельсона не было ошибки: физика того времени допускала возможность наблюдения абсолютного движения Земли. Значит, если оно в действительности ненаблюдаемо, то необходимо внести исправления в самые основы тех рассуждений, которые привели к выводу о наблюдаемости абсолютного движения Земли. Такая революционная мысль вдохновила многих, и в предложениях недостатка не было, но наиболее известной и оказавшей самое значительное влияние на умы современников была гипотеза о сокращении масштабов, выдвинутая голландским физиком Лоренцем [8].

По мысли Лоренца, если некий стержень в состоянии покоя имеет длину l_0 , а при движении относительно эфира — длину l , то $l = l_0$ в случае, когда направление абсолютного движения перпендикулярно стержню, и $l < l_0$, если стержень движется вдоль своей длины. Относительное сокращение длины стержня k определяется величиной скорости v : при $v = 0$, разумеется, $k = 1$, но при возрастании v k быстро уменьшается и стремится к нулю, ког-

да v приближается к скорости света c . Иначе говоря, стержень, движущийся вдоль своей оси со скоростью, близкой к скорости света, имеет почти нулевую длину. График зависимости k от v показан на рис. 5.

Планируя свой опыт, Майкельсон ожидал, что время T_1 движения пучка света L_1 будет в $1/k$ раз больше времени T_2 движения пучка света L_2 , то есть что $kT_1 = T_2$ [9]. Но если верна гипотеза Лоренца, то в расчет Майкельсона надо внести исправления. С точки зрения наблюдателя A , находящегося в абсолютной системе отсчета, плечо OM_1 движется со скоростью v вдоль своей длины, поэтому, согласно Лоренцу, оно должно сократить длину в k раз, так что истинное время движения пучка света L_2 будет не T_1 , а kT_1 . Плечо OM_2 тоже движется со скоростью v , но перпендикулярно своей длине, следовательно, по Лоренцу, оно длины не меняет и пучок L_2 затратит на свой путь время T_2 , то самое, которое подсчитал Майкельсон. В итоге окажется, что пучки L_1 и L_2 затрачивают на путь одинаковое время. Следовательно, опыт Майкельсона не позволяет обнаружить абсолютное движение Земли.

Тем самым оказывалось, что абсолютное движение Земли ненаблюдаемо и обнаружившееся было противоречие между основами физики того време-

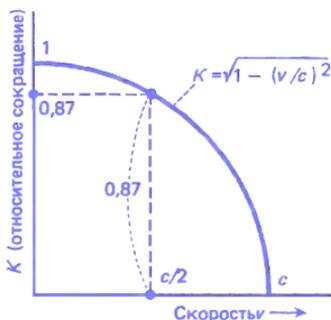


Рис. 5. Зависимость относительного сокращения длины стержня k от скорости его движения v

ни и опытом устранялось. Лоренцева гипотеза «спасала лицо» тогдашней физики.

Но означала ли эта гипотеза подлинное решение вопроса? Конечно, нет. Она только подменяла один вопрос другим. С точки зрения тогдашней физики проблема не могла считаться решенной до тех пор, пока не найдено объяснение, почему движущееся тело уменьшает в k раз свой размер в направлении движения.

Пытаясь обосновать гипотезу сокращения масштабов, Лоренц, в частности, рассуждал следующим образом [10]. Против того, что уравнения Максвелла справедливы в абсолютной системе отсчета, никто не возражает. Но, может быть, отрицательный результат опыта Майкельсона указывает нам, что уравнения Максвелла в неизменном виде справедливы также и в любой инерциональной системе S_1 , движущейся относительно эфира в каком угодно направлении с какой угодно скоростью? Тогда для земного наблюдателя скорость света была бы во всех направлениях одинакова, то есть времена T_1 и T_2 совпадали бы.

Такая идея, конечно, противоречит здравому смыслу. Как ясно из рис. 4 и рис. 2, для наблюдателя, движущегося относительно эфира со скоростью v , скорость света в направлении движения равна $c-v$, а в обратном направлении $c+v$. Этот результат, понятный школьнику и подтверждаемый здравым смыслом, вытекает из правила сложения скоростей, которое следует из принципа относительности Галилея. Если твердо придерживаться этого обычного правила сложения скоростей, то уравнения Максвелла не могут оставаться неизменными в системе отсчета S_1 .

И Лоренц задался вопросом: как нужно изменить правило сложения скоростей для того, чтобы и в системе S_1 , движущейся с абсолютной скоростью

v , уравнения Максвелла имели ту же самую форму, как и в абсолютной системе отсчета? Говоря более общо, речь шла о попытке отойти от диктуемого здравым смыслом обычного правила сложения скоростей при наблюдении движения физического тела из двух инерциальных систем отсчета S и S_1 , движущихся друг относительно друга, то есть о замене этого обычного правила сложения другим, совершенно новым соотношением.

Таким образом, речь шла об изменении формул связи между результатами наблюдений одного и того же тела из разных систем отсчета. В физике преобразованием системы координат называют в общем случае правило, показывающее, как связаны между собой наблюдения одного и того же тела при изменении точки зрения на него, то есть при переходе наблюдателя из системы отсчета S в систему отсчета S_1 . Вывод обычного, согласующегося со здравым смыслом правила сложения скоростей основан на применении обычных *галилеевых преобразований систем координат*, которыми мы все пользуемся безотчетно. Идея Лоренца состояла в том, чтобы вместо этих преобразований вывести новые, которые почти не отличались бы от галилеевых для явлений повседневной жизни и в то же время не изменяли бы формы законов электромагнитного поля. Иначе говоря, Лоренц требовал, чтобы законы электромагнитного поля в системах отсчета S и S_1 имели одинаковый вид.

Искомые преобразования координат Лоренц нашел. Сейчас их называют преобразованиями Лоренца [11]. Разумеется, из них вытекает гипотеза сокращения масштабов. И все же поначалу было трудно понять явление сокращения длины тел в направлении их движения, в частности, то, что коэффициент сокращения k определяется только скоростью движения и не зависит от свойств веще-

ства, из которого состоит тело. Чтобы по-настоящему понять это, потребовалось создание частной теории относительности.

Частный принцип относительности Эйнштейна

Современники по-разному оценивали результат опыта Майкельсона. Те, кто видел в нем лишь попытку определить абсолютную скорость Земли, считали, что опыт закончился неудачей. Но так думать не все. Ведь проблематичным было само существование абсолютной системы отсчета. Может быть, и постановка вопроса об абсолютной скорости Земли тоже неправомерна? Если так, то результат опыта Майкельсона надо понимать как ясное указание природы на то, что в *инерциальной системе отсчета S , связанной с Землей, скорость света независимо от направления его распространения постоянна и равна c , то есть совпадает с величиной, вычисленной из уравнений Максвелла*. Но тогда выходит, что Майкельсон установил важнейший экспериментальный факт и его опыт завершился огромным успехом.

Похоже, что Эйнштейн придерживался второй точки зрения. Я написал «похоже» потому, что в своей статье 1905 г., первой из статей, посвященных теории относительности, Эйнштейн не упоминает имени Майкельсона. Но не может быть, чтобы Эйнштейн вообще не слышал об этом известнейшем эксперименте, выполненном в конце XIX в. Думаю, что этот опыт, несомненно, оказал на Эйнштейна большое влияние.

Эйнштейн постулировал, что *все физические законы выглядят совершенно одинаково в любых инерциальных системах отсчета*. Это утверждение известно как эйнштейновский принцип относительности

(в настоящее время его называют частным принципом относительности). Смысл принципа можно также выразить словами: если в некоторой инерциальной системе отсчета S мы наблюдаем какое-то физическое явление, то это явление будет происходить точно таким же образом и в любой другой инерциальной системе отсчета S_1 . Таким образом, принцип относительности означает эквивалентность всех инерциальных систем отсчета.

Принцип относительности Галилея, о котором мы говорили выше, отличается от частного принципа относительности Эйнштейна тем, что Галилей утверждает эквивалентность инерциальных систем отсчета только по отношению к механическим движениям, в то время как Эйнштейн — по отношению ко всем без исключения физическим явлениям.

В галилеевом случае при учете немеханических явлений, например явления распространения света, между инерциальными системами намечается дифференциация и выделяется одна привилегированная (абсолютная) система отсчета. Если же следовать принципу Эйнштейна, то различные инерциальные системы совершенно равноправны по отношению ко всем физическим явлениям, так что абсолютная, особая инерциальная система просто не может существовать. Следовательно, попытки определить абсолютную скорость бессмысленны. С этой точки зрения отрицательный результат опыта Майкельсона надо воспринимать как естественный.

Принцип постоянства скорости света

Частный принцип относительности не содержит конкретного рецепта правильной записи физических законов; чтобы внести в них нужные исправления, надо привлечь дополнительные сообра-

жения. В предыдущем параграфе мы уже говорили, что в применении к электродинамике Лоренц такие соображения нашел: правила перехода от одной инерциальной системы к другой (преобразования Лоренца) он конкретизировал, потребовав, чтобы уравнения Максвелла выглядели совершенно одинаково в любой инерциальной системе отсчета. Однако если берешься за исправление всех физических законов, то желательно по возможности избегать опоры на какую-то, хотя, может быть, и верную, но слишком узкую теорию (например, на теорию Максвелла), потому что в будущем в такой узкой теории могут вскрываться те или иные недостатки, и тогда перестроенную на ее основе общую физическую теорию придется снова переделывать.

Предпочтительнее избрать в качестве принципа, положенного в основу перестройки всей физики, какой-либо твердо установленный и охотно признаваемый всеми экспериментальный факт. Лоренц при выводе своих преобразований опирался на теорию Максвелла, но она в полном объеме для вывода преобразований Лоренца не нужна. И Эйнштейн построил новую физическую систему, получившую название частной теории относительности, используя в качестве исходного принципа только одно из положений теории Максвелла. Конечно, принцип Эйнштейна согласуется с теорией Максвелла, но поскольку она к этому принципу не сводится, то, даже если в будущем в ней обнаружатся дефекты и от нее придется отказаться, избранное Эйнштейном в качестве основы утверждение может остаться верным, и тогда, несмотря на «гибель» почти всей теории Максвелла, частная теория относительности «выживет».

Эйнштейн постулировал, что *скорость света в вакууме не изменяется при изменении состояния движения источника света*. Иначе говоря, он потребовал,

чтобы скорость света в вакууме не зависела от того, движется или покоится источник света. Выдвинутое Эйнштейном требование называют *принципом постоянства скорости света*.

Заключенное в этом принципе утверждение отнюдь не очевидно. В самом деле, обозначим u измеренную неподвижным наблюдателем скорость стрелы, выпущенной из лука стрелком A , стоящим на утесе (рис. 6). Если скачущий со скоростью v всадник B посылает стрелу с такой же силой, как и A ,

Рис. 6. Скорость стрелы

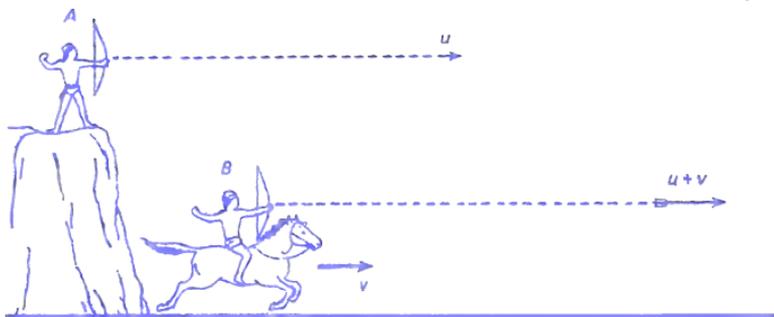
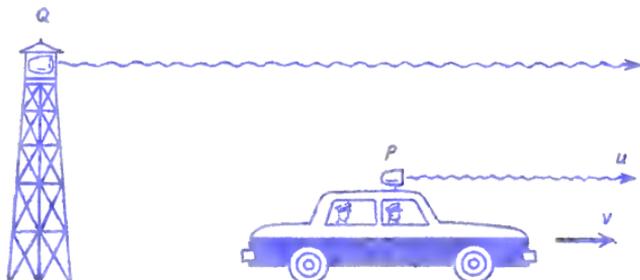


Рис. 7. Скорость распространения звуковых волн



то неподвижный наблюдатель увидит, что стрела, испущенная B , летит со скоростью $u+v$. Далее, обозначим u скорость распространения в воздухе звука, издаваемого сиреной, находящейся на пожарной вышке. Понятно, что с той же скоростью будет распространяться в воздухе звук от сирены, установленной на мчащейся со скоростью v патрульной полицейской машине (рис. 7). Скорость звука в воздухе зависит от степени его неоднородности, температуры, давления, но не зависит от состояния движения источника звука. Заранее не ясно, как ведет себя скорость распространения света: как скорость стрелы или как скорость звука? Узнать ответ на этот вопрос можно только из опыта. Основываясь на экспериментальных фактах, Эйнштейн постулировал, что в смысле связи с движением источника свет аналогичен звуку.

Объединение принципа постоянства скорости света и частного принципа относительности приводит к ряду следствий, неприемлемых для обычного здравого рассудка. Поэтому появление частной теории относительности было сенсационным не только для «широкой публики», но и для специалистов-физиков. Поскольку читателю, может быть, интересно ознакомиться с некоторыми из таких необычных выводов, мы рассмотрим их в следующем параграфе.

Пространство-время

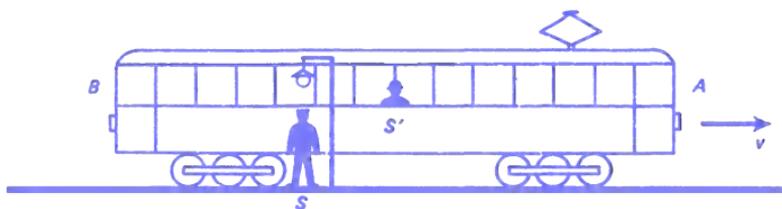
Обсудим, не прибегая к математике, некоторые любопытные факты из частной теории относительности. Начнем с мысленного эксперимента, обычно приводимого в учебниках.

Пусть глубокой ночью мимо платформы слева направо со скоростью v проносится погруженная во тьму электричка-экспресс (рис. 8). На платформе точно под погасшим фонарем стоит станционный служащий S . В тот самый момент, когда сидящий

в центре вагона пассажир S' поравняется со служащим, фонарь на мгновение вспыхнет и тут же погаснет. Попробуем разобраться, как служащий S и пассажир S' воспримут распространение света фонаря внутри вагона.

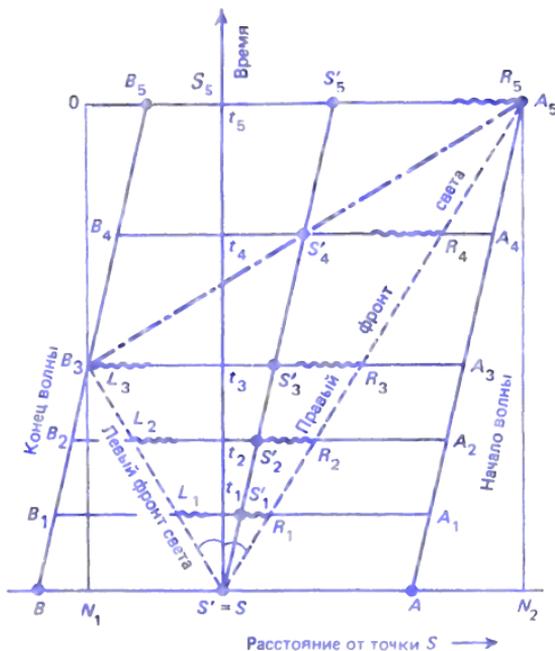
На рис. 9 показаны графики зависимости от времени положения вагона и фронта света с точки зрения станционного служащего S . На самой нижней горизонтальной прямой точками A и B отмечено положение вагона в момент вспышки фонаря, когда центр вагона S' находится как раз напротив служащего S . С течением времени вагон сдвигается вправо; на рисунке показаны его положения в пять моментов времени t_1, t_2, \dots, t_5 . Например, через t_1 секунд после вспышки вагон занимает положение A_1B_1 , правый фронт светового импульса оказывается в положении R_1 , а левый — в положении L_1 . В момент t_3 левый фронт светового импульса достигает задней стенки вагона B_3 , а правый фронт импульса, находящийся в точке R_3 , еще не успевает осветить переднюю стенку, которая в момент t_3 занимает положение A_3 . Правый фронт светового импульса достигает передней стенки вагона в момент t_5 . Таким образом, станционный служащий S видит, что сначала освещается задняя стенка вагона, а затем, по прошествии $t_5 - t_3$ секунд, световой импульс достигает также и передней стенки A_5 .

Рис. 8. Опыт с вагоном электропоезда (1)



Как воспринимает те же события сидящий в центре вагона пассажир S' ? Заметим прежде всего, что платформа, на которой стоит служащий S , — инерциальная система отсчета. Так как вагон движется с постоянной по величине и направлению скоростью, система отсчета S' тоже инерциальна. Наблюдатель S' видит, что установленный на платформе фонарь движется справа налево с постоянной скоростью v . Этот движущийся источник света вспыхивает и гаснет как раз в тот момент времени, когда

Рис. 9. Графики зависимости от времени положения вагона и фронта света



он находится против наблюдателя S' . В силу принципа постоянства скорости света, с точки зрения наблюдателя S' , свет, испущенный движущимся фонарем, будет распространяться так же, как если бы он был испущен фонарем, укрепленным на потолке вагона, в котором сидит S' .

Применим теперь частный принцип относительности. Если наблюдатель S видит, что свет от покоящегося относительно S фонаря распространяется вправо и влево с одной и той же скоростью c , то, с точки зрения S' , так же должен вести себя свет, испущенный покоящимся относительно S' фонарем. Итак, если бы свет был испущен фонарем, укрепленным на потолке вагона, то согласно частному принципу относительности пассажир S' должен был бы увидеть, что свет распространяется вправо и влево с одной и той же скоростью c .

Комбинируя выводы, следующие из частного принципа относительности и из принципа постоянства скорости света, и вспоминая, что пассажир S' сидит в центре вагона, заключаем, что для S' свет, проникший в окно вагона, будет распространяться по вагону вперед и назад с одной и той же скоростью c и достигнет обоих концов вагона в один и тот же момент времени. Итак, наблюдатель S утверждает, что задняя стенка вагона B освещается вспышкой раньше передней стенки A , а наблюдатель S' настаивает, что обе стенки A и B освещаются в один и тот же момент времени. Как видим, сообщения обоих наблюдателей существенно различаются.

Получается, что события, произошедшие в двух разных местах, с точки зрения наблюдателя S' , случились одновременно, а с точки зрения S — не одновременно. Иными словами, понятие одновременности оказалось зависящим от состояния движения наблюдателя. Такой вывод, противоречащий воспитанному в нас веками здравому смыслу, есть резуль-

тат совместного применения двух рассмотренных выше принципов; говорят, что мы пришли к выводу *об относительности понятия одновременности*.

Напомним обычную трактовку одновременности. Пусть события, происходящие в двух разных точках, видит неподвижный наблюдатель и наблюдатель, движущийся относительно первого с постоянной скоростью v . Если для одного из них оба события произошли одновременно, то они выглядят одновременными также и для второго. Иными словами, обычное понятие одновременности имеет абсолютный характер. Абсолютность одновременности означает, что в любом месте и для любого наблюдателя время течет одинаково. С обычной точки зрения ход времени совершенно не зависит от положения в пространстве: в любых уголках Вселенной время одно и то же — общее, абсолютное.

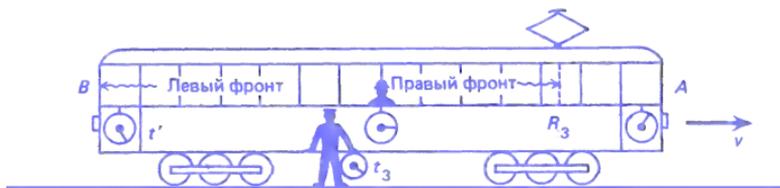
А в частной теории относительности согласно полученному нами выводу время, которым пользуется станционный служащий S , отличается от времени пассажира S' . То, что для S' произошло одновременно, кажется наблюдателю S неодновременным. Предположим теперь, что все пассажиры вагона сверили свои часы с часами пассажира S' . Это значит, что, с точки зрения S' , часы всех пассажиров показывают время, совпадающее со временем на его часах. Обозначим t' момент времени, в который, по часам S' , вспышка света осветила оба конца вагона.

Уже отмечалось, что, по часам станционного служащего S , задняя стенка вагона освещается в момент t_3 (см. рис. 9). В этот момент для S правый фронт светового импульса находится в точке R_3 и передняя стенка вагона A_3 еще погружена во тьму. Таким образом, служащий S видит, что часы пассажира, сидящего вблизи стенки A_3 , показывают время, меньшее t' , так как свет еще не успел дойти

до A_3 . Пассажиры в вагоне знают, что они согласовали показания своих часов, а станционный служащий видит, что часы у пассажиров отстают тем сильнее, чем ближе к началу вагона они сидят. Это положение пояснено на рис. 10, где изображена видимая служащим S ситуация в момент, когда левый фронт светового импульса осветил заднюю стенку вагона.

Из рисунка ясно, что соотношение между временем на часах пассажиров вагона и временем на часах наблюдателя S зависит от места, которое занимает в вагоне пассажир. Согласно преобразованию Галилея при переходе из инерциальной системы отсчета S в систему S' время не преобразуется (в обеих системах отсчета используется одно и то же общее время), а частная теория относительности утверждает, что время тоже преобразуется, причем по-разному в разных местах пространства. Это означает, что нельзя, как это делали раньше, рассматривать время в отрыве от пространства. Поэтому Эйнштейн объединил пространство и время в одно многообразие, получившее название пространств-времени [12]. Единая трактовка пространства и времени — одна из самых радикальных особенностей частной теории относительности.

Рис. 10. Опыт с вагоном электропоезда (II)



Преобразование Лоренца

Чтобы описать движение физического тела, надо избрать для наблюдений какую-то конкретную инерциальную систему отсчета S и следить за положениями тела в последовательные моменты времени. Естественно, что при переходе в другую инерциальную систему отсчета S' видимое поведение тела изменится. Всякому ясно, что движущийся наблюдатель припишет тому же самому телу другую последовательность положений, но этого мало: как мы убедились в предыдущем параграфе, согласно частной теории относительности переход к другой инерциальной системе, кроме изменения пространственных координат, сопровождается еще зависящим от координат изменением времени. Преобразованием пространственно-временных координат мы будем называть правило перехода от пространственных координат и времени, используемых для описания траектории тела в системе отсчета S , к новым координатам и новому времени, при помощи которых надо описывать траекторию того же тела в системе отсчета S' . Эйнштейн вывел это преобразование, исходя из двух постулированных им принципов. Оказалось, однако, что найденное Эйнштейном преобразование пространственно-временных координат полностью совпадает с преобразованием, установленным ранее Лоренцем, так называемым преобразованием Лоренца. Отдавая честь первооткрывателю, мы тоже будем далее называть преобразование пространственно-временных координат в частной теории относительности преобразованием Лоренца.

Разумеется, что два вывода преобразования Лоренца — вывод самого Лоренца и вывод Эйнштейна — имеют много общего. Об этом мы уже говорили выше — при объяснении принципа постоян-

ства скорости света. И все же вывод Эйнштейна более фундаментален и прост. Кроме того, Эйнштейн ввел совершенно новое понятие — пространство-время, которое проясняет глубинный смысл преобразования Лоренца. Поэтому заслуги Эйнштейна перед наукой намного превосходят заслуги Лоренца [13].

Образно говоря, частный принцип относительности и принцип постоянства скорости света — родители преобразования Лоренца; в нем оба указанных принципа получили единое и конкретное воплощение. Стимулом к выводу преобразования Лоренца послужило стремление заменить диктуемое здравым смыслом преобразование Галилея другим преобразованием, при выполнении которого все физические законы имели бы одинаковый вид в любой из движущихся друг относительно друга инерциальных систем отсчета S и S' . Для осуществления такого замысла, кроме вывода преобразования Лоренца, надо было еще внести исправления во все физические законы, чтобы сделать их инвариантными относительно лоренцева преобразования. И Эйнштейн такую работу выполнил: он переписал заново всю физику. Именно эта новая физика и составляет содержание знаменитой частной теории относительности.

Но поскольку ее полное изложение увело бы нас в сторону от темы данной книги, я ограничусь сказанным и в заключение главы перечислю несколько известных результатов частной теории относительности. Начнем с лоренцева сокращения масштабов. Вернемся еще раз к рис. 9 и обсудим теперь вопрос о длине вагона. Вообще при измерении длины разумно придерживаться следующей процедуры: изготовленную заранее линейку надо приложить к измеряемому телу и против концов тела нанести на линейку метки, после чего произвести считывание отмеченного на линейке расстояния. Метки на линейку надо

наносить одновременно, иначе процедура измерения длины лишается смысла. Особенно важно выполнить последнее условие при измерении длины движущегося тела.

В системе отсчета S вагон движется, при этом точки A_3, B_3 (или A, B) отмечают координаты концов вагона в один и тот же (для наблюдателя S) момент времени. Следовательно, расстояние между этими точками l и будет длиной движущегося вагона, измеренной наблюдателем S . Аналогично точки A_5, B_5 отмечают координаты концов вагона в один и тот же (для наблюдателя S') момент времени (момент t'). Значит, длиной вагона, измеренной наблюдателем S' , будет расстояние l_0 между A_5 и B_5 .

Таким образом, наблюдатели S и S' при измерении длины одного и того же вагона получают разные результаты. Задняя стенка вагона для обоих наблюдателей находится в одной и той же точке B_3 , а отмеченное наблюдателем S' положение A_5 передней стенки вагона оказывается продвинутым вправо дальше, чем положение этой стенки A_3 , указанное наблюдателем S . Глядя на рис. 9, каждый читатель согласится, что длина вагона l_0 , измеренная покоящимся относительно вагона наблюдателем S' , больше длины l , найденной движущимся относительно того же вагона наблюдателем S . Разница между l_0 и l возникла за счет того, что для покоящегося и движущегося наблюдателей понятие одновременности имеет разный смысл [14].

Еще один эффект частной теории относительности — замедление скорости хода движущихся часов — тоже выводится из преобразования Лоренца. Запись уравнений ньютоновой механики в форме, согласующейся с частной теорией относительности, приводит к выводу о том, что инертная масса движущегося тела больше массы того же тела в состоянии покоя и что энергия тела пропорциональ-

на его инертной массе, или, что то же, тяжести. Например, из двух тел, одно из которых имеет температуру 0°C , а второе 100°C , тяжелее второе, потому что в нем запасено больше тепловой энергии, чем в первом.

Хотя все перечисленные эффекты и противоречат здравому смыслу, но связанные с ними отклонения по величине настолько малы, что в повседневной жизни заметить их практически невозможно.

Например, если ракета длиной 50 метров летит со скоростью 100 километров в секунду, то лоренцево сокращение длины ее корпуса составляет микроскопическую величину — три тысячных миллиметра.

Помещенные на этой ракете часы по сравнению с часами на Земле будут отставать на две десяти-тысячные доли секунды за час. Далее, при нагреве одной тонны воды от 0°C до 100°C ее вес увеличится на пять тысячных миллиграмма; такую маленькую добавку к весу кубометра воды и представить себе трудно. Таким образом, хотя на первый взгляд выводы из частной теории относительности выглядят как чрезвычайно революционные, в действительности предсказываемые ею отклонения от того, к чему мы привыкли в нашей повседневной жизни, пренебрежимо малы. Но поскольку эта теория произвела революционный переворот в самых основах физического мышления, она оказала огромное влияние на последующее развитие науки.

Об энергии

Обсудим, в каком смысле физики употребляют такое всем близкое и привычное понятие, как энергия.

Под энергией имеют в виду способность производить работу. Лежащий на земле камень не опасен: он ничего не может сделать. Напротив, брошенный

камень, попадая в стакан, может его разбить, а стукнув человека — поранить. Таким образом, летящий камень, из-за того что он движется, может произвести разнообразную работу (я, правда, приводил сплошь отрицательные примеры его возможностей, но это не меняет дела). Имея в виду такую способность летящего камня, говорят, что камень обладает кинетической энергией. Текущая вода в отличие от стоячей имеет кинетическую энергию: если поток воды встретит водяное колесо, он приведет его в движение, которое можно использовать для выполнения разных работ, будь то помол риса или выработка электроэнергии.

Находящийся сверху неподвижный камень в отличие от камня, лежащего на земле, обладает энергией, так как, если убрать подпорку, он, набирая скорость в свободном падении, может, достигнув земли, со страшной силой ударить по находящимся на земле предметам. Чем выше начальное положение камня, тем больше запасенная им энергия. У двух одинаковых камней, один из которых расположен выше другого, запас энергии отличается на величину, пропорциональную разности высот, на которых покоятся камни. Энергию покоящегося тела, зависящую от положения, называют потенциальной энергией.

Кинетическая и потенциальная энергии — разные проявления механической энергии. Кроме механической, энергия выступает и в других формах. Известно, что, включив электродвигатель, можно выполнить многие работы; этот пример показывает, что электричество тоже обладает энергией. Энергия бывает световой, тепловой, химической, атомной и т. д.; разные формы энергии свободно переходят друг в друга. Например, включая электричество, вы зажигаете электролампу. При этом наблюдается превращение электрической энергии в световую. Но каковы бы

ни были превращения энергии из одной формы в другую, полная, суммарная энергия с течением времени не может ни возрасти, ни уменьшиться. Это утверждение — один из основных экспериментальных фактов физики.

Теория относительности по-новому осветила также и понятие энергии. Как мы видели выше, энергия — это разновидность способности; энергия — не масса. И тем не менее в какой бы форме энергия ни выступала, она сама по себе обладает пропорциональной ей по величине инертной массой. И обратно: когда нечто обладает тяжестью, в этом «нечто» обязательно заключена энергия.

ГЛАВА 3 ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Границы применимости частной теории относительности

В предыдущей главе, сказав, что Эйнштейн привел в соответствие с частной теорией относительности все законы физики, я допустил неточность: есть одно исключение. С ней никак не удавалось согласовать законы силы тяжести (всемирное тяготение). Это — один из недостатков частной теории относительности.

Лежащий в ее основе частный принцип относительности состоит в утверждении, что все инерциальные системы отсчета эквивалентны друг другу (между ними нет привилегированных). Иначе говоря, переход из одной инерциальной системы в другую не изменяет вида законов природы.

Но существует сколько угодно систем отсчета, не являющихся инерциальными. Строго говоря, неинерциальна уже система отсчета, связанная с Землей (об этом говорилось в начале предыдущей главы). Но частная теория относительности ничего не сообщает нам о том, как изменяются физические законы при переходе в неинерциальную систему отсчета. Это тоже слабость теории.

Отмеченные слабые места частной теории относительности указывают на границы ее применимости. Эти слабости тесно связаны друг с другом. Из попыток их преодоления родилась еще более великая теория — общая теория относительности.

Но сначала мы поговорим о взаимосвязи двух отмеченных недостатков частной теории относительности.

Если некоторая система отсчета движется относительно инерциальной системы с постоянной по величине и направлению скоростью, то она тоже инерциальна, но если вторая система отсчета движется ускоренно, то легко понять, что она инерциальной не является. В самом деле, пусть мы наблюдаем за телеграфными столбами из окна поезда, постепенно набирающего скорость. Мы увидим, что, хотя на столбы и не действует сила, они все быстрее устремляются в направлении, обратном направлению движения поезда, в явном противоречии с законом инерции.

Имея в виду сказанное, проделаем мысленный эксперимент. Вообразим ящик, покоящийся во Вселенной настолько далеко, что на него не действуют никакие внешние силы. Ящик этот буквально «парит в воздухе». Находящийся в ящике человек *A*, выпуская из рук яблоко, обнаруживает, что оно неподвижно парит рядом с ним, из чего он заключает, что находится в инерциальной системе отсчета (рис. 11,а).

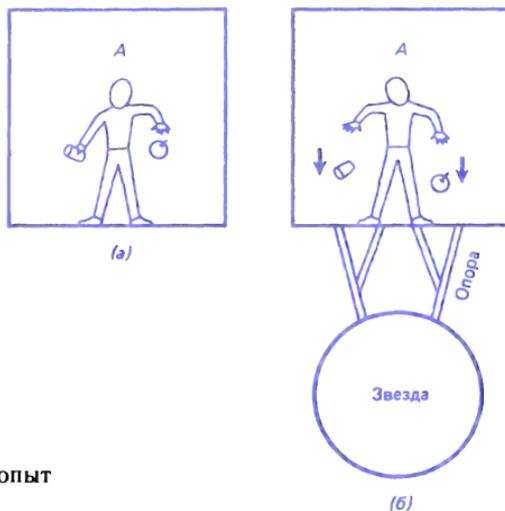


Рис. 11. Мысленный опыт с ящиком (I)

Но однажды утром, выпустив из рук чашку и яблоко, *A* обнаруживает, что *оба эти предмета падают по направлению к полу с одинаковым, постоянным по величине ускорением*. Вчерашний опыт подсказывает *A*, что его система отсчета инерциальна. Поэтому из факта падения яблока и чашки он делает вывод, что вместе с ящиком он оказался помещенным в гравитационное поле. Не иначе как за ночь под ящиком родилась огромная звезда (рис. 11, б). Вывод о появлении гравитационного поля звезды «человек в ящике» сделал на основании наблюдения падения тел: особенности движения яблока и чашки, отмеченные выше курсивом, характерны как раз для движения тел в поле тяжести.

В знаменитых опытах, выполненных на «падающей башне» в Пизе, Галилей показал, что все тела независимо от их веса и состава в поле тяжести падают с одинаковым ускорением. Причина этого эффекта — установленный позднее Этвешем факт, заключающийся в том, что *инертная и тяжелая масса тел пропорциональны друг другу*. Набранное курсивом утверждение мы обсуждали выше на стр. 17—18.

Применим теперь к случаю, когда на тело действует сила тяжести, то есть к случаю падения тела в поле силы тяжести, второй закон Ньютона, именно формулу, приведенную на стр. 16. В числитель правой части этой формулы надо подставить силу тяжести (вес тела), а в знаменатель — инертную массу. Но, согласно результату Этвеша, эти величины пропорциональны друг другу. Если, скажем, знаменатель увеличить вдвое, то и числитель увеличится в два раза, а отношение не изменится. Таким образом, ускорение для любых тел одно и то же. Это характерная особенность силы тяжести. Приведенное рассуждение обосновывает сделанный наблюдателем *A* вывод, что отмеченные выше курсивом

(см. стр. 63) свойства движения тел указывают на появление силы тяжести.

А теперь представим себе еще один ящик, тоже парящий где-то далеко во Вселенной (рис. 12). Находящийся в нем наблюдатель B тоже считает свою систему отсчета инерциальной, так как выпущенное им из рук яблоко парит рядом. Но на этот раз «бес не дремлет»: этот негодник незаметно приделал веревку к потолку ящика и в один прекрасный день внезапно потянул ящик вверх с постоянным ускорением.

Выпуская из рук яблоко и чашку и видя, что *оба этих предмета падают на пол с одинаковым ускорением*, наблюдатель B поймет, что что-то случилось. Какой же причиной объяснит он наблюдаемые явления?

Наблюдатель S_G , восседающий в центре тяжести далекой Вселенной, видит, что относительно его инерциальной системы отсчета ящик поднимается вверх с постоянным по величине ускорением. Следовательно, связанная с ящиком система отсчета перестала быть инерциальной в тот самый момент, когда бес-проказник потянул за веревку: такой вывод легко понять, вспомнив рассуждение о разгоняющемся поезде в начале главы. Для наблюдателя S_G все предметы по-прежнему парят неподвижно, а с постоянным ускорением поднимается только пол (стенки ящика). Именно так видит происходящее наблюдатель S_G .

Но наблюдатель B вряд ли придет к выводу, что его ящик тянет за веревку ухмыляющийся бес. Скорее, исходя из предыдущего опыта, он будет верить, что и теперь в его системе удовлетворяется закон инерции, и решит, что новое поведение предметов обусловлено действием каких-то природных сил. Поскольку истинная причина видимого поведения предметов заключается в том, что ящик и сам B уско-

ренно движутся вверх, все предметы падают к полу с одинаковым ускорением. Но это как раз характерный признак падения предметов в поле тяжести. Короче говоря, наблюдатели *A* и *B* испытывают совершенно одинаковые ощущения. Поэтому наблюдатель *B*, скорее всего, примет то же решение, которое принял наблюдатель *A*: он тоже вообразит, что под ящиком внезапно возникла новая звезда, которая и притягивает все предметы.

В третьем мысленном эксперименте мы возвратимся к ящику с наблюдателем *A*, который неподвижно укреплен над звездой (см. рис. 11,б), и предположим, что расшалившийся бес внезапно выбил из-под ящика подставку. Под действием тяжести ящик со всем содержимым станет падать на звезду, *A* увидит, что он сам (а также яблоко и чашка) находится в состоянии свободного парения, и решит, по-видимому, что сила тяжести исчезла. Иными словами, придет к заключению: он вновь попал, как и перед появлением звезды под ящиком, в инерциальную систему отсчета, в которой не действуют никакие силы, в том числе и сила тяжести.

Но наблюдатель S_G по-иному увидит эту ситуацию: для него *A* ускоренно падает на звезду. Поэтому S_G решит, что система отсчета, в которой очутился *A*, перестала быть инерциальной, но сила

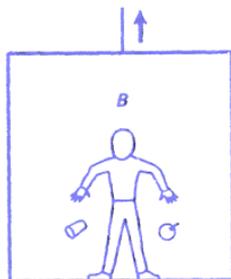


Рис. 12. Мысленный опыт с ящиком (II)

тяжести для A отнюдь не исчезла, она продолжает на него действовать. Исчезновение силы тяжести, регистрируемое наблюдателем A , — кажущийся эффект.

Рассмотренные выше три мысленных эксперимента показывают, что при учете силы тяжести трудно различить инерциальную и неинерциальную системы отсчета, а запертый в ящике наблюдатель не в состоянии отличить влияние ускоренного движения ящика от действия на ящик внешнего гравитационного поля. Следовательно, в рамках частной теории относительности физика явлений в поле тяжести, действующем в инерциальной системе отсчета (первый опыт с наблюдателем A), тождественна физике явлений в неинерциальной системе отсчета, в которой отсутствует поле тяжести (второй опыт — с наблюдателем B). Значит, при учете поля тяжести надо обязательно ввести в рассмотрение неинерциальные системы отсчета, то есть выйти за рамки частной теории относительности. Таким образом, не удивительно, что с нею никак не удавалось согласовать законы тяготения.

Общий принцип относительности и принцип эквивалентности

Результаты описанных выше трех мысленных экспериментов Эйнштейн подытожил в виде двух утверждений, принятых им в качестве принципов. Первый из них гласит: *в любой системе отсчета независимо от того, является она инерциальной или неинерциальной, все законы природы имеют одинаковый вид*. Его называют общим принципом относительности. Напомним, что по частному принципу относительности *все законы природы имеют одинаковый вид в любой инерциальной системе отсчета*. Видно, что в новой формулировке отброшено огра-

ничество инерциальными системами отсчета. Поэтому частный принцип относительности — это частный случай общего принципа относительности, чем и объясняется появление прилагательного «частный» в его названии [15].

Одного только общего принципа относительности недостаточно для построения теории. Читатель, вероятно, сам легко укажет случаи, когда этот принцип не имеет места. Рассмотрим, например, первый и третий мысленные эксперименты с ящиком, описанные в предыдущем параграфе. В первом случае наблюдатель A находится в инерциальной системе отсчета и предметы в ящике под действием притяжения звезды падают на пол в согласии со вторым законом Ньютона. В третьем опыте система отсчета наблюдателя A неинерциальна. Предметы в ней неподвижны, несмотря на то что на них, так же как и в первом опыте, действует сила притяжения звезды; значит, второй закон Ньютона неверен. Но такой вывод противоречит общему принципу относительности, который, следовательно, не применим к неинерциальной системе отсчета, используемой в третьем мысленном опыте. Однако если согласиться с наблюдателем A , полагающим, что сила тяжести в ящике действительно исчезла, то второй закон Ньютона оказывается верным, а общий принцип относительности становится применимым также и к третьему опыту с ящиком.

Поэтому Эйнштейн принял в качестве принципа еще одно утверждение: *силу тяжести можно создать или уничтожить переходом в систему отсчета, движущуюся с ускорением*. Если ограничиться чисто механическими явлениями, смысл сказанного хорошо известен из ньютоновой механики.

Согласно ньютоновой механике переход в систему отсчета, движущуюся относительно данной с ускорением, сопровождается появлением кажущейся

щейся силы инерции, направленной в каждой точке противоположно ускорению системы отсчета и действующей на любое тело. Тогда ускоренное убежание телеграфных столбов в примере с разгоняющимся поездом (рассмотренном в начале главы) объясняется тем, что на столбы действует сила инерции, направленная противоположно ускорению поезда. Таким образом, при учете силы инерции законы механики выполняются также и в системе отсчета, связанной с поездом. Но Эйнштейн рассматривает силу инерции не как кажущуюся силу, а как новую разновидность настоящей силы тяжести. В этом заключается смысл утверждения, набранного курсивом в предыдущем абзаце.

Согласно второму принципу в третьем опыте с ящиком в тот самый момент, когда ящик начал падать, в нем стала действовать новая сила тяжести, направленная вверх, которая полностью компенсировала силу притяжения звезды. В результате для наблюдателя в ящике сила тяжести действительно исчезла. Во втором опыте ящик ускоренно поднимается веревкой, поэтому в нем возникает новая сила тяжести, направленная вниз. При такой интерпретации общий принцип относительности выполняется как во втором, так и в третьем опыте с ящиком.

Важно подчеркнуть следующее. Сила инерции, считаемая в ньютоновой механике ненастоящей, кажущейся силой, эйнштейновским принципом повышена в ранге до настоящей природной физической силы. Более того, она рассматривается как настоящая сила не только для механических, но и вообще для всех физических явлений. Это — крайне важная интерпретация, ее не было в ньютоновой механике. Насколько сказанное существенно, читатель поймет в следующем параграфе. Как бы то ни было, в общей теории относительности сила инерции и по

форме и по существу считается настоящей силой тяжести. Поэтому второй свой принцип Эйнштейн назвал принципом эквивалентности.

Не следует забывать еще одно важное обстоятельство: *при отсутствии силы тяжести верна частная теория относительности*. Обычные учебники, «внезапно посуровев», отказываются признавать такое утверждение третьим принципом общей теории относительности. Но фактически при ее построении Эйнштейном оно играло роль, по важности сравнимую с ролью первого и второго принципов.

Опыт с лифтом

Общую теорию относительности иногда понимают как простое обобщение частной. Но в начале данной главы уже указывалось, что с самых первых шагов эта теория имела глубокую связь с проблемой тяготения. Она, можно сказать, и задумана была для прямого рассмотрения гравитации, которую не удавалось описать в рамках частной теории относительности, то есть мыслилась Эйнштейном как релятивистская теория гравитации, призванная заменить ньютонову теорию всемирного тяготения. Иначе говоря, общую теорию относительности можно трактовать как грандиозную эпопею о совершенно новых эйнштейновских идеях по поводу природы тяготения. Он пришел к своим идеям, рассматривая ставший знаменитым мысленный эксперимент с лифтом. Мы тоже начнем с этого мысленного опыта.

Прежде чем приступить к делу, обсудим вопрос о том, искривляет ли свой путь свет под действием силы тяжести. В первой главе указывалось, что свет — это разновидность электромагнитных волн, иначе говоря, распространение в вакууме переменной напряженности электрического и магнитного полей. Таким образом, свет — это не тяжелое ве-

щество. А по закону всемирного тяготения источниками силы тяжести являются только физические тела и сама сила тяжести действует тоже лишь на тяжелые тела. Поэтому можно подумать, что сила тяжести не влияет на электромагнитные волны.

Но последние несут энергию, а по частной теории относительности энергия пропорциональна инертной массе, которая, в свою очередь, согласно Эйнштейну, пропорциональна тяжести. Таким образом, вроде бы оказывается, что свет тоже имеет тяжесть. Но тогда распространяющийся в пространстве свет должен искривлять свой путь под действием притяжения Земли.

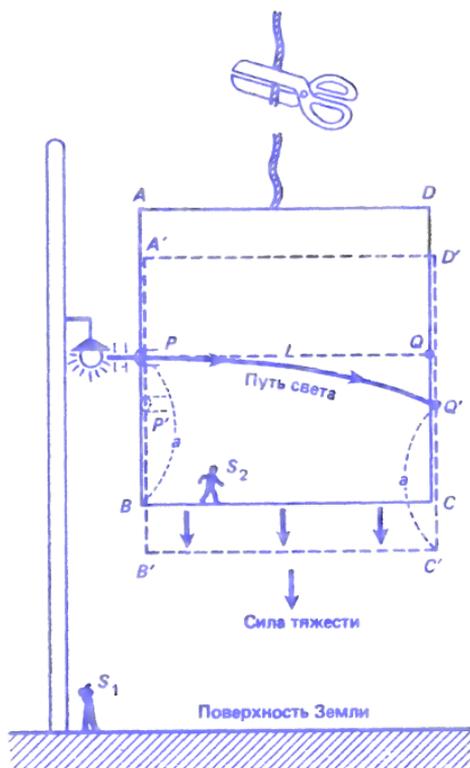
Вспомним еще, что в свое время имела распространение корпускулярная теория света, по которой свет мыслился как поток мельчайших корпускул. Поскольку сообщаемое силой тяжести ускорение не зависит от веса тела, как бы ни были легки образующие свет корпускулы, они должны, подобно камням, описывать в поле земного тяготения параболы.

Наконец, обсудим вопрос с позиций эфирной теории света. Сила тяжести, действуя на вещество эфира, создает в нем неоднородное распределение плотности. Мы знаем, что неоднородность плотности воздуха вблизи Земли приводит к неоднородности показателя преломления и как следствие — к искривлению пути светового луча. К аналогичному искривлению привела бы неоднородность плотности вещества эфира, возникающая в поле тяжести. Но поскольку эфир как вещество в действительности не существует, такое искривление лучей, по-видимому, не должно возникать. Таким образом, разные подходы к проблеме не дают определенного ответа и остаются неясным, влияет ли сила тяжести на движение света.

Для ответа на поставленный вопрос рассмот-

рим поясняемый рис. 13 мысленный эксперимент с лифтом. На рис. 13 показано, что увидит в этом опыте наблюдатель S_1 , стоящий на земле. В левой стенке лифта на расстоянии a от пола проделано небольшое отверстие P . Сначала лифт (ящик) подвешен на веревке и покоится в положении $ABCD$. Точно напротив отверстия расположен погашенный фонарь. В некоторый момент фонарь мгновенно вспыхивает и снова гаснет; в тот же самый момент пере-

Рис. 13. Мысленный опыт с лифтом (I)



резается веревка и лифт начинает свободно падать в поле тяжести Земли. Проникший в отверстие P свет в первый момент движется горизонтально в направлении противоположной стены DC . Как поведет себя этот луч света в дальнейшем? Ответ зависит от того, движется ли наблюдатель или нет.

Сначала выслушаем наблюдателя S_2 . Как уже говорилось в предыдущем параграфе при обсуждении третьего опыта с ящиком, для S_2 , находящегося в свободно падающем лифте, полностью исчезает гравитационное поле. Особенно важно для нас здесь то, что исчезновение тяжести — не просто формально-механическое преобразование, а физический факт: поле тяжести исчезает также и для света (мы воспользовались принципом эквивалентности). Следовательно, S_2 не может сомневаться в справедливости частной теории относительности. Проникший в отверстие P горизонтальный луч света будет, не меняя направления, распространяться со скоростью c к противоположной стене. Обозначая l ширину лифта (расстояние AD), получим, что через l/c секунд после вспышки луч света достигнет точки Q , находящейся как раз напротив точки P . Точка Q расположена в середине стены DC , на расстоянии a от пола лифта (на рис. 13 видна небольшая щель между фонарем и отверстием P , но мы пренебрегаем шириной этой щели).

Теперь послушаем наблюдателя S_1 . По его мнению, всюду — внутри и вне лифта — действует притяжение Земли. В момент вспышки света лифт имел нулевую начальную скорость, а в течение всего времени распространения света от точки P до точки Q лифт свободно падал в земном поле тяжести со все возрастающей скоростью. На рис. 13 положение лифта в момент, когда свет достиг стенки DC , изображено четырехугольником $A'B'C'D'$; точка, освещенная на противоположной стене лифта, зани-

мает положение Q' . Следовательно, свет на пути от P до Q' описал параболу L . Итак, в земном поле тяжести свет движется подобно камню: его лучи искривляются в виде параболы. Тем самым мы ответили на поставленный вопрос. На первый взгляд ответ очень прост, но в действительности он паразителен и дает информацию для глубоких размышлений. Последуем же за мыслями великого человека.

Показанная на рис. 14 трубка PQ' представляет собой увеличенное изображение луча света L с рис. 13. Сечение трубки MM' дает положение конца светового луча в некоторый промежуточный момент времени, а сечение NN' — положение конца светового луча в некоторый последующий момент времени. За разделяющий эти сечения незначительный интервал свет проходит от точки M к точке N и от точки M' к точке N' . Для нашего рассуждения важно заметить, что луч света L в целом изогнут в виде показанной на рис. 13 дуги. Значит, расстояние MN' меньше расстояния MN ; иначе говоря, лучи, идущие по нижней стороне световой трубки, распространяются медленнее лучей, идущих по ее верхней стороне. Это — удивительный вывод. Замеченный нами факт более точно и общо формулируется словами: *скорость света в областях, близких к источнику гравитационного поля (в нашем случае — Земле), меньше скорости света в областях, удаленных от источника поля тяжести. Или: чем сильнее гравитационное поле на пути света, тем медленнее свет распространяется.*

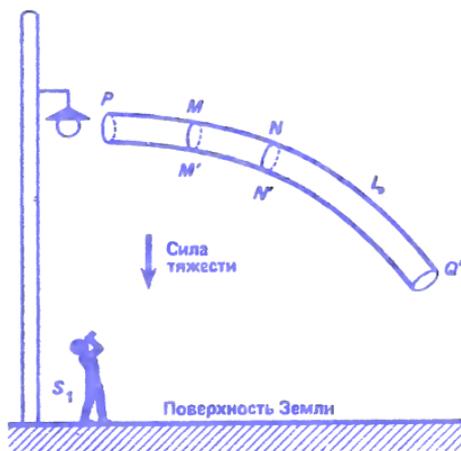
Этот вывод первоначально получен в общей теории относительности чисто теоретическим путем. Согласно ему скорость света максимальна в отсутствие гравитационного поля, когда, по частной теории относительности, она равна c . В общем же случае скорость света меньше c . Мы пришли к та-

кому результату из теоретических соображений, и если бы сделанное предсказание получило экспериментальное подтверждение, мы имели бы доказательство правильности провозглашенных Эйнштейном принципов. Экспериментальная проверка предсказания Эйнштейна впервые была произведена во время солнечного затмения в 1919 г. группой английских исследователей, которые полностью подтвердили выводы общей теории относительности.

На рис. 13 и 14 искривление светового луча сильно преувеличено, действительное отклонение крайне мало; заметить его в опыте с лифтом совершенно невозможно из-за того, что скорость света чересчур велика, а притяжение Земли недостаточно сильно.

В упомянутом опыте во время солнечного затмения измерялось, насколько отклонится световой луч удаленной звезды, проходящий точно по краю сол-

Рис. 14. Искривление пути света



нечного диска. Притяжение на краю солнечного диска приблизительно в 30 раз больше притяжения на поверхности Земли. И столь огромная сила тяжести отклонила световой луч всего на 1,75 угловой секунды. Поэтому в нашем повседневном опыте можно смело считать, что свет распространяется прямолинейно.

Сказанным не исчерпываются поучительные выводы из опыта с лифтом; хорошо поразмыслив, можно нащупать совершенно новый подход к вопросу о природе силы тяжести. Мы обсудим это в следующем параграфе.

Околоземное пространство

Взглянем еще раз на рис. 13, относящийся к опыту с лифтом. Поскольку для находящегося в ящике наблюдателя S_2 верна частная теория относительности, он видит, что в соответствии с законами оптики свет распространяется по кратчайшему пути, связывающему точки P и Q (в данном случае — по прямой PQ).

Но из общего принципа относительности мы знаем, что физические законы одинаковы для любого наблюдателя. Значит, законы, верные для наблюдателя S_2 , должны быть верны и для наблюдателя S_1 . Иначе говоря, видимый наблюдателем S_1 путь луча света L тоже проходит вдоль кратчайшей линии, связывающей точки P и Q' .

В евклидовой геометрии кратчайший путь между двумя точками — прямая линия. Поэтому искривленность кратчайшего пути означает, что для наблюдателя S_1 пространство вблизи земной поверхности не описывается евклидовой геометрией. Иначе говоря, пространство вблизи Земли (заполненное создаваемым Землей гравитационным полем) не является евклидовым пространством.

Но наблюдатель S_2 видит, что луч света между

точками P и Q идет по прямой линии; значит, для S_2 пространство, по крайней мере внутри ящика, евклидово. С утверждением, что природа пространства (факт его евклидовости или неевклидовости) зависит от состояния движения наблюдателя, очень трудно согласиться. Обдумаем этот вопрос еще раз, воспользовавшись теперь рис. 15.

На рис. 15 показано, что увидит наблюдатель S_2 , если он находится в очень широком свободно падающем лифте. Земля со всевозрастающей скоростью приближается к днищу лифта. Маленькие черные кружочки на рисунке — яблоки, играющие роль пробных тел. Сила земного притяжения, действующая на яблоки, изображена сплошными стрелками, направленными к центру Земли; направления этих стрелок для разных яблок, естественно, разные. Пунктирными стрелками показана действующая на яблоки сила тяжести «нового типа» (введенная Эйнштейном при формулировке принципа эквивалентности). Это сила, возникающая при свободном падении лифта и направленная против направления свободного падения. В старой ньютоновой механике ее считали кажущейся; для всех яблок она направлена в одну и ту же сторону — вверх. Сила тяжести отсутствует для яблока A : действующие на него вверх и вниз силы взаимно компенсируются, и тяжесть исчезает. Но для других яблок такой компенсации не происходит, особенно хорошо это видно на примере яблок D и E . Относительно яблока F о компенсации и говорить нечего, наоборот, обе силы, действующие на F , направлены в одну сторону и эффективная тяжесть яблока F удваивается.

Выше утверждалось, что в свободно падающем лифте сила тяжести равна нулю. Но из рис. 15 ясно видно, что такое утверждение верно лишь для точек, находящихся вблизи яблока A . Чем дальше от A , тем сильнее сказывается нескомпенсированность си-

лы притяжения Земли. Причина этого — в неоднородности земного поля тяжести: сплошные стрелки на рисунке показывают, что в разных точках сила тяжести имеет разное направление; кроме того, она быстро ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния от яблока до центра Земли. Короче говоря, наблюдатель S_2 обнаруживает, что евклидова геометрия, справедливая при нулевой силе тяжести, верна только вблизи точки A .

Это напоминает ситуацию с кривыми линиями: очень малый участок кривой линии легко спутать с отрезком прямой. Теперь ясно, что если в очень широком свободно падающем лифте пустить свет слева направо, то, поскольку вблизи боковых стенок лифта сила тяжести остается нескомпенсированной, наблюдатель S_2 тоже заметит, что луч света искривился.

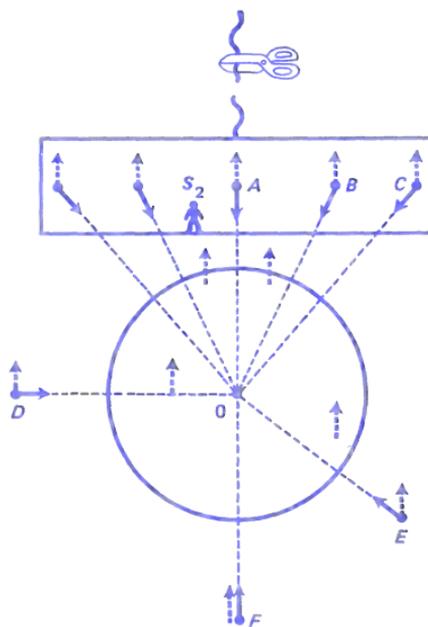


Рис. 15. Мысленный опыт с лифтом

Итак, окружающее Землю пространство не является евклидовым.

О кривизне пространства

Отвлечемся немного от основной темы нашего повествования и поговорим о пространстве. Окружающее нас пространство — объемная протяженность. Чтобы лучше уяснить смысл этих слов, попробуем описать положение подвешенной к потолку комнаты лампы, показанной на рис. 16, *а*. Если она находится на *a* метров к северу от южной стены, на *b* метров к западу от восточной стены и на высоте *c* над полом комнаты, то этих трех чисел вполне достаточно для точного указания ее положения. Вообще тремя числами *a*, *b*, *c* характеризуется положение любого предмета (строго говоря, точки) в комнате. Поэтому окружающее нас пространство называют трехмерным. Для характеристики момента времени, в который некий предмет помещен в какую-то пространственную точку, к указанной тройке чисел достаточно добавить еще одно число. Поэтому единое многообразие, включающее и пространственную протяженность и время — так называемое пространство-время (этот термин мы обсуждали в гл. 2), четырехмерно.

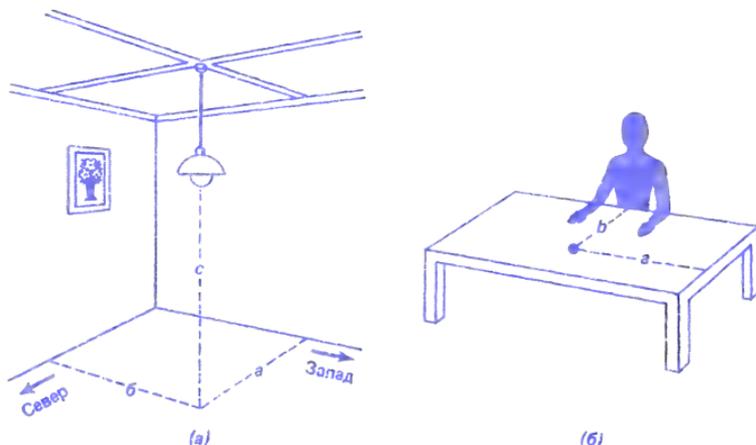
Для определения места, занимаемого предметом (точкой) на поверхности стола, например стола, показанного на рис. 16, *б*, достаточно указать два числа: расстояние *a* от левого края стола и расстояние *b* от края, ближайшего к наблюдателю. Поэтому не только поверхность стола, но и любую плоскую, а также и искривленную поверхность, называют двухмерным пространством или двухмерной протяженностью.

Поскольку трехмерное пространство трудно нарисовать, мы здесь будем говорить о двухмерном про-

странстве. Плоскость — двумерное евклидово пространство, так как сумма внутренних углов любого лежащего в ней треугольника равна 180° . Другое доказательство евклидовости плоскости — известный всем факт, заключающийся в том, что кратчайший путь между двумя точками на плоскости — отрезок прямой линии.

Сфера — тоже двумерное пространство, но это пространство неевклидово. Напомним, что большим кругом на сфере называют ее сечение плоскостью, проходящей через центр шара, ограничиваемого этой сферой. Кратчайший путь между двумя точками сферы проходит по дуге большого круга, проведенного через эти точки. Так, по дуге большого круга плывет корабль, идущий прямым рейсом из Йокагамы в Сан-Франциско. Поэтому дуги большого круга играют на сфере роль, аналогичную роли отрезков прямых на плоскости. Если из трех дуг большо-

Рис. 16. Способы определения положений предметов



го круга построить на сфере треугольник, то сумма его внутренних углов окажется больше 180° , откуда тоже следует, что сфера — неевклидово пространство.

Представим себе сеть, сплетенную из резиновых нитей в виде правильной квадратной решетки. На рис. 17, а показано, как выглядит эта сеть, положенная на гладкую плоскую поверхность стола. Если же на столе оказалась перевернутая миска, то после накрывания стола с миской нашей сетью получится поверхность с шишкой. Около миски резиновые нити изогнутся и растянутся, и, хотя они стремятся стать возможно короче, из-за присутствия миски им не удастся выпрямиться. Достаточно одного взгляда на рис. 17, б, чтобы по искривлению и деформации нитей сразу понять, в каком месте расположена шишка. Деформированная таким образом сеть — тоже пример искривленной поверхности.

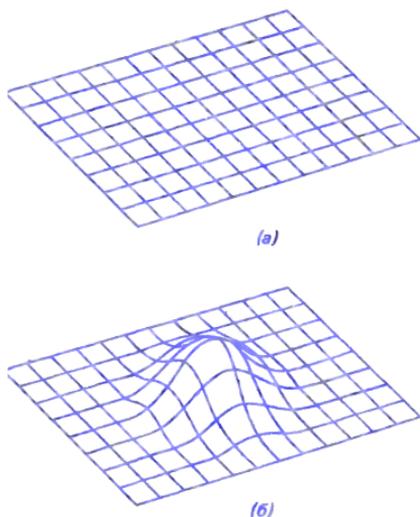


Рис. 17. Плоская и криволинейная поверхности

Вообще характерной особенностью кривой поверхности является отличие кратчайших линий от отрезков прямых. Так же как и сфера, плоскость с шишкой — двумерное неевклидово пространство. Искривленное трехмерное пространство вообразить себе очень трудно, но можно надеяться, что рассмотренные двумерные примеры помогут составить о нем хоть какое-то представление. Во всяком случае кратчайшие пути в кривом трехмерном пространстве не являются отрезками прямых линий.

Сила тяжести и кривизна пространства

Вернемся к нашей основной теме. Искривление кратчайших путей между точками некоторой области указывает на то, что в этой области пространство неевклидово или, что то же, имеет кривизну. Иначе говоря, сила тяжести эквивалентна искривлению пространства. Именно эта мысль выражает суть основной идеи Эйнштейна о природе тяготения. Повторим ее еще раз: область, в которой с физической точки зрения присутствует гравитационное поле, с геометрической точки зрения является областью искривленного, неевклидова пространства.

Чтобы лучше разъяснить смысл новой эйнштейновской интерпретации, рассмотрим аналогию. На рис. 18 показан кусок прозрачного стекла. Если внутри его нет никаких инородных включений или деформаций и он совершенно однороден, то свет,

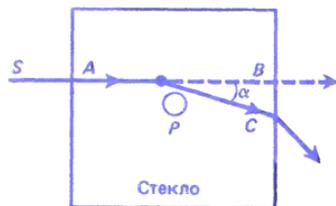


Рис. 18. Прохождение луча света сквозь кусок стекла

распространяющийся от точки A к противоположной точке B , будет идти по прямой линии AB . Но если в некоторую точку P попало инородное тело, в окрестности которого образовалась деформация, то свет искривит свой путь, например пойдет вдоль кривой AC (в зависимости от вида деформации отклонение светового луча может, конечно, выглядеть совершенно иначе, в частности, свет может пройти вдали от инородного тела P и отклониться в противоположном направлении). Изображенный на рис. 18 путь светового луча выглядит так, как будто неоднородность P притянула свет. Мы, конечно, этого не думаем. Но каждый согласится, что причиной преломления светового луча в данном случае явилась деформация в окрестности точки P .

Схема явления, которое наблюдала во время солнечного затмения группа английских исследователей с целью проверки теории Эйнштейна, очень напоминает рис. 18. Луч света далекой звезды SA , входя в окрестность Солнца, преломляется в его поле тяжести и распространяется в направлении C . Измерявшийся англичанами угол отклонения соответствует показанному на рис. 18 углу α между направлением AB светового луча в отсутствие Солнца и действительным направлением отклоненного Солнцем луча PC . Здесь, так же как в случае со стеклом, инородное тело (Солнце), внесенное в пустое пространство, в котором не было никакого вещества, искривило пространство вблизи себя, в результате чего преломился путь светового луча. Таков подлинный смысл эйнштейновской интерпретации.

Вместо света можно рассмотреть влетающий в направлении SA метеорит, который, подобно свету, пойдет по искривленному пути AC . В ньютоновой механике изогнутость пути метеорита объясняют тем, что массивный метеорит притягивается Солнцем.

К такому объяснению мы привыкли, на ней основан наш здравый смысл. А по Эйнштейну, отклонение света или метеорита объясняется неоднородностью искривления пространства вблизи Солнца. Таким образом, по мысли Эйнштейна, движение и света, и массивных тел надо интерпретировать аналогично тому, как интерпретируется преломление света в стекле.

В примере со стеклом причиной деформации было инородное включение, а деформировалось само стекло. Понятно, что в случае поля тяжести роль инородного включения отводится Солнцу, но трудно воспринять искривление пустого пространства, соответствующее деформации стекла. Однако выше неоднократно подчеркивалось, что искривление пространства вблизи Солнца означает утрату пространством свойства быть евклидовым. Значит, «внесение» Солнца в пустое пространство приводит к изменению свойств пространства вблизи светила. С такой формулировкой читатель, я надеюсь, согласится более охотно.

В заключение сделаем важное замечание. Истолкование силы тяжести как искривления пространства, вообще говоря, могло бы оказаться просто словесным упражнением: заранее не ясно, есть ли (кроме различия в терминологии) действительная разница между ньютоновой теорией всемирного тяготения и новой теорией гравитации Эйнштейна. Или, проще говоря, чем же отличаются друг от друга следствия, вытекающие из этих двух теорий и проверяемые экспериментально? У читателя, возможно, уже созрел вопрос: в чем конкретная разница между двумя теориями?

По ньютоновой теории притяжение испытывают только массивные тела, а на свет, разновидность электромагнитных волн, сила тяжести не действует. Согласно же теории Эйнштейна в поле тяжести про-

странство искривляется, и какой бы объект (массивное тело или свет) сквозь него ни двигался, несмотря на стремление к прямолинейному движению, он искривит свой путь. В этом отличие между двумя теориями. Следовательно, наблюдение отклонения света в поле тяжести могло бы решить вопрос о выборе между двумя теориями. В этом смысле крайне важен результат, полученный английскими наблюдателями солнечного затмения, который решил спор в пользу теории Эйнштейна [16].

У читателя могло сложиться впечатление, что свет и массивные тела движутся в поле тяжести одинаково, но это совершенно не так. Главное отличие между светом и массивными телами состоит в том, что свет не может остановиться, он всегда движется вперед, а массивные тела могут пребывать в состоянии покоя. Это приводит к большим различиям между траекториями массивных тел и формой лучей света.

Истинные и фиктивные гравитационные поля

Выше говорилось, что гравитационное поле, в сущности, — искривление пространства. Но оно оказывает также влияние и на ход времени. По этому поводу мы, не вдаваясь в подробности, ограничимся только формулировками. Применение двух принципов Эйнштейна приводит к выводу, что *по мере приближения к источнику гравитационного поля ход времени замедляется или чем сильнее гравитационное поле, в которое помещены часы, тем медленнее они идут*. Влияние гравитационного поля на ход времени и искривление пространства тесно взаимосвязаны; анализ показывает, что истинная природа гравитационного поля заключается в искривлении четырехмерного пространства-времени.

Величину, выражающую в общем случае меру искривленности пространства, называют в математике кривизной. Чтобы получить представление о степени кривизны, рассмотрим сферическую поверхность и сравним наше восприятие сферы небольшого радиуса и сферы столь огромной, как поверхность Земли. Относительно Земли мы с трудом осознаем, что ее поверхность искривлена, зато даже беглый взгляд на небольшую сферу убеждает в ее искривленности. Отсюда ясно, что чем меньше шарик, ограничиваемый сферой, тем больше ее кривизна. В обратном предельном случае, то есть при стремлении радиуса шара к бесконечности, любой участок сферы приближается к плоскости — его кривизна стремится к нулю.

Прежде чем перейти к обсуждению связи между кривизной пространства-времени и силой гравитационного поля, разграничим понятия истинной и фиктивной гравитации. Рассмотрим еще раз рис. 15: с небес на Землю свободно падает широкий ящик, в середине которого есть область нулевого гравитационного поля, а вблизи краев, как отмечалось выше, гравитационное поле некомпенсировано. Если бы этот ящик падал не в земном гравитационном поле, а в поле силы тяжести, величина и направление которой во всех точках пространства одни и те же, то для наблюдателя в ящике тяжесть исчезла бы полностью сразу во всех точках пространства. В земном поле тяжести такая полная компенсация невозможна из-за его неоднородности: как пояснено на рис. 15, в разных точках околоземного пространства сила земного притяжения имеет разные направления и величину. Поле тяжести, которое для наблюдателя в свободно падающем ящике полностью исчезает в любых уголках пространства, называют фиктивным, потому что его можно создать искусственно в пространстве-времени без гравитационно-

го поля, если потянуть ящик с наблюдателем за веревку.

Еще один пример фиктивного гравитационного поля — поле центробежной силы, возникающее в системе отсчета, связанной с вращающимся диском. В данном случае поле неоднородно: центробежная сила зависит как от направления, так и от расстояния до оси вращения. И тем не менее это поле — фиктивное, так как его можно уничтожить сразу во всем пространстве, затормозив диск.

Итак, фиктивные гравитационные поля не обязательно однородны. Им можно дать следующее общее определение. Поле тяжести в некоторой области фиктивно, если оно может быть уничтожено сразу во всей области (строго говоря, во всем пространстве) переходом в подходящую систему отсчета.

Напротив, если никакие искусственные меры типа перехода в другую систему отсчета при любом выборе последней не позволяют скомпенсировать гравитационное поле сразу во всей области (а не только в каком-то небольшом участке), то такое гравитационное поле называют истинным. Хорошие примеры истинного гравитационного поля — поля притяжения Земли и Солнца.

Рассматривавшиеся нами при объяснении принципа эквивалентности гравитационные поля, которые создавались и уничтожались переходом в ускоренную систему отсчета (например, лифта), согласно сделанному определению, конечно, были фиктивными. А гравитационное поле Земли, как видно из рис. 15, удастся скомпенсировать лишь в очень малой окрестности одной точки.

Чтобы решить, истинно или фиктивно гравитационное поле, надо исследовать его в достаточно широкой области пространства. Если при этом сила тяжести не изменяется ни по величине, ни по направлению, то поле фиктивно: его можно устранить, на-

пример, пересадкой в свободно падающий лифт. Истинная сила тяжести всегда неоднородна.

Истинное гравитационное поле не может оставаться неизменным при изменении места наблюдения или скорости хода часов; иначе говоря, градиент величины и направления истинного гравитационного поля не может тождественно равняться нулю.

Это необходимое условие истинности гравитационного поля.

Законы гравитации

Пространство нулевой кривизны евклидово. На языке физики в таком пространстве-времени отсутствует истинное гравитационное поле. Фиктивное в счет не идет, так как его можно устранить сразу во всем пространстве-времени пересадкой в соответствующим образом изготовленный лифт. Поэтому вопрос о наличии или отсутствии истинного гравитационного поля эквивалентен вопросу о том, равна ли нулю четырехмерная кривизна пространства-времени. Согласно сказанному в конце предыдущего параграфа это означает, что пространственный и временной градиенты величины и направления силы тяжести должны выражаться через кривизну пространства-времени.

В ньютоновой теории всемирного тяготения источником гравитационного поля была тяготеющая масса (тяжесть) тел, а формула, выражающая гравитационное поле через тяготеющие массы тел — источников поля, называлась законом всемирного тяготения.

Закон этот, конечно, сыграл большую роль в создании эйнштейновской теории гравитации; при ее построении он учтен в максимально возможной степени. К уравнениям своей теории гравитации Эйнштейн пришел путем обдумывания различных

наводящих соображений, указаний и ограничений, среди которых основными были следующие: первое — связь между четырехмерной кривизной пространства-времени и распределением источников истинного гравитационного поля; второе — пропорциональность тяготеющей и инертной масс тела и пропорциональность заключенной в теле энергии его инертной массе; третье — постулат ньютоновой теории тяготения, утверждающий, что никакие свойства тел, за исключением их тяготеющей массы, не являются источниками гравитационного поля; четвертое — энергией обладает не только вещество, но и свет (вообще электромагнитные волны). Эти уравнения — важнейшая составная часть общей теории относительности. Смысл их в том, что источником кривизны пространства-времени, то есть источником истинного гравитационного поля, является рассеянная по пространству-времени энергия.

В ньютоновой теории источником поля тяжести считают тяготеющую массу тела, а по Эйнштейну, источником гравитации является энергия вообще, в какой бы форме она ни проявлялась — в форме энергии покоя тяготеющей массы или какой-либо еще. Энергией обладает не только свет (электромагнитные волны), но и само гравитационное поле. Поэтому Эйнштейн приходит к выводу, что, подобно телам, обладающим тяготеющей массой, гравитационное поле само может порождать гравитационное поле. Последнее утверждение — характерная особенность теории Эйнштейна, его не было в ньютоновой теории всемирного тяготения.

Прежде чем найти правильные уравнения гравитационного поля, даже такой титан, как Эйнштейн, прошел душевные муки и тяжкие испытания. Например, один из предложенных им промежуточных вариантов теории гравитации противоречил провозглашенному самим же Эйнштейном общему прин-

ципу относительности [17]: и Эйнштейн тогда написал, что в сфере действия общего принципа относительности надо сделать исключение для гравитационного поля, ибо в противном случае неизбежен абсурдный результат: из удовлетворяющих общему принципу относительности уравнений гравитационного поля невозможно определить распределение этого поля. Когда он пытается склонить читателей к принятию такого странного, по существу, приспособленческого заявления, ему приходится прибегать к чрезвычайно казуистическим доводам [18]. Однако при чтении его статей создается впечатление, что меньше всех склонен верить своим софизмам именно сам автор. И действительно, в следующем 1915 г. он нашел, наконец, правильные уравнения гравитационного поля, о которых мы говорили. Разумеется, правильная теория удовлетворяет общему принципу относительности. А за год до того он объявил, что теория гравитации не должна подчиняться общему принципу относительности, и доказывал, что если бы она ему удовлетворяла, то это привело бы к абсурду! Как, собственно говоря, надо это понимать? Конечно, сказанное никоим образом не бросает тень на величие Эйнштейна, но с точки зрения психологии творчества очень интересно [19].

Завершив в 1905 г. частную теорию относительности, Эйнштейн следующие 10 лет настойчиво стремился устранить ее недостатки и, наконец, в одиночку создал исключительную по красоте и силе общую теорию относительности. Кроме того, за это время он предложил понятие фотона (кванта света) и написал много других, не менее великих и творчески оригинальных статей. Меня никогда не оставляло впечатление, что в его лице нам явился мессия — сын божий в человеческом облике, подобный Христу. Читая его статьи, видишь, как всякий раз, когда развитие теории останавливается у развилки, он вы-

бирает именно тот путь, по которому в дальнейшем наука развивается легко и свободно.

В заключение этого параграфа я хочу разъяснить эпохальное значение эйнштейновской теории гравитации. Пространство — вместилище вещества, оно же — арена для пьесы, название которой — «природные явления», а исполнители — разные формы вещества. Ни на миг не прерываясь, эта пьеса идет с седой древности до вечного будущего. Арена «дана от бога» — она устроена по образцу евклидова пространства, описываемого евклидовой геометрией, и совершенно не зависит от содержания пьесы и действий актеров (вещества). Время, как вода, течет в темпе, совершенно не связанном с деталями устройства арены. Таковы были наши представления о пространстве и времени до появления частной теории относительности.

Благодаря частной теории относительности стало ясно, что бытовавшее ранее представление о раздельном существовании пространства и времени неверно: прежнюю арену заменили на новую — четырехмерное пространство-время. Но это изменение — единственное из новшеств, введенных частной теорией относительности: на новой арене (пространстве-времени) продолжала разыгрываться прежняя пьеса.

Общая теория относительности говорит нам, что геометрия пространства не обязана быть евклидовой. В окрестности больших небесных тел — Солнца или Земли — пространство, искривляясь, теряет свойство евклидовости. Каковы в некотором месте свойства пространства (точнее, пространства-времени), определяется теперь уже не богом, а по законам силы тяжести, поведением источников этой силы — Солнца или Земли. Даже человечество, работая руками и механизмами, может, изменяя распределение вещества, контролировать в какой-то

мере геометрию пространства. Реально достижимая степень такого контроля пока ничтожна, он не поддается регистрации, но в принципе подобный контроль возможен.

Как уже отмечалось, до появления общей теории относительности природа пространства и времени считалась заданной «от бога», она не могла быть предметом человеческой деятельности, а являлась объектом метафизики. Общая теория относительности сделала ее объектом физики, низвела, так сказать, до физического уровня. Это поистине революционное открытие. Создание общей теории относительности, то есть эйнштейновской теории гравитации, стало не просто подвигом в физике; этим был внесен великий вклад во всю науку, включая философию.

Для прежней физики вопрос о геометрической природе космоса представлял неразрешимую задачу. По общей теории относительности, с одной стороны, свойства космоса определяют распределение в нем небесных тел, а с другой стороны, распределение небесных тел определяет геометрические свойства космоса. Таким образом, в виде общей теории относительности человечество впервые получило инструмент исследования структуры всего космоса в целом. Именно этим объясняется оживление космологии и космофизики, последовавшее за рождением общей теории относительности.

Экспериментальная проверка

Выше объяснялось, что Эйнштейн построил свою теорию чисто дедуктивным путем, исходя из немногих экспериментально подтвержденных принципов. Но хотя его теория очень систематична и по форме безупречна, необходима была экспериментальная проверка выводимых из нее следствий.

Экспериментальное подтверждение этих следствий показало бы, что общая теория относительности верна [20]. В противном случае, несмотря на всю свою логическую убедительность, теория оказалась бы просто выдумкой, забавной игрой воображения, и от нее пришлось бы отказаться.

Положенные в основу общей теории относительности принципы сильно отличаются от принципов теории Ньютона, а примененный Эйнштейном математический аппарат гораздо сложнее аппарата старой физики. Поэтому широко распространилось мнение, что как с понятийной, так и с математической стороны теория Эйнштейна трудна для понимания. В то же время выводимые из нее физические следствия отличались от следствий ньютоновой механики весьма незначительно. В частности, применение новой теории к явлениям земного масштаба приводило к столь мизерному отличию от выводов ньютоновой механики, что измерить разницу при помощи доступных тогда технических средств оказалось совершенно невозможным. На ум невольно приходила поговорка «гора родила мышь».

Но столь резкое осуждение не обосновано. Просто ньютонова механика, действительно, очень хорошо описывает окружающие нас физические явления. Сказанное в предыдущем абзаце, скорее, надо понимать не как порицание теории Эйнштейна, а как похвалу теории Ньютона.

Если для выявления разницы между двумя теориями земное притяжение чересчур слабо, надо попробовать воспользоваться полем тяжести другого небесного тела. Мы уже несколько раз говорили, что для проверки одного из следствий эйнштейновской теории — уменьшения скорости света в областях с сильным гравитационным полем — было использовано поле тяжести Солнца: отклонение света вблизи края солнечного диска, наблюдавшее-

ся во время солнечного затмения, подтвердило этот вывод общей теории относительности.

Наблюдения с использованием поля тяготения Солнца подтвердили также вывод Эйнштейна о замедлении хода времени в областях с сильным гравитационным полем.

Третий из подтвержденных экспериментально эффектов общей теории относительности — вращение перигелия Меркурия, но я на нем не останавливаюсь, а лучше скажу несколько слов о черных дырах — теме, которая стала модной в последнее время.

Понятие черной дыры имеет отношение к первому из перечисленных эффектов общей теории относительности: чем сильнее гравитационное поле, тем меньше скорость света. Поэтому, может быть, в крайне сильном гравитационном поле скорость света обратится в нуль? Выше отмечалось, что на Солнце сила тяжести примерно в 30 раз больше, чем на Земле. Подобно силе электрического взаимодействия, сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими телами. Поэтому если Солнце начать сжимать, то при сжатии в два раза сила тяжести на его поверхности станет больше в $2^2 = 4$ раза. Современный радиус Солнца около 700 000 километров, и оно примерно в 300 000 раз тяжелее Земли. Всестороннее сжатие Солнца при условии, что его вес не изменяется, приведет к быстрому возрастанию силы тяжести на его поверхности. Насколько надо сжать Солнце, чтобы скорость испускаемого им света оказалась равной нулю?

Расчет, основанный на общей теории относительности, показывает, что скорость света на поверхности Солнца обратится в нуль, если радиус нашего светила станет равным 3 километрам. Сила тяжести на его поверхности возрастет тогда примерно в 50

миллиардов ($5 \cdot 10^{10}$) раз, то есть будет больше, чем на Земле, примерно в 1500 миллиардов ($1,5 \cdot 10^{12}$) раз. Вещество, весящее на Земле один грамм, на поверхности такого сжатого Солнца будет весить полтора миллиона тонн.

Благодаря столь сильному притяжению любые приближающиеся к этому Солнцу тела будут «всасываться» им. Во избежание недоразумений замечу следующее. На первый взгляд при такой огромной силе тяжести любое тело будет падать на Солнце с колоссальной скоростью, но это не так. Ведь даже скорость распространения света становится равной нулю, а скорость тел, имеющих вес, всегда меньше скорости света. Поэтому их скорость, так же как и скорость света, обращается в нуль: при наблюдении из областей, удаленных от Солнца, будет казаться, что все тела, постепенно замедляя свое падение, останавливаются у его поверхности. Световой сигнал, посланный из этих удаленных областей в направлении Солнца, тоже остановится вблизи солнечной поверхности. Часы, укрепленные на любом из посланных к Солнцу тел, оставаясь исправными, вблизи его поверхности перестанут идти: сила тяжести там настолько велика, что останавливается ход времени.

Ничто не сможет покинуть это сжатое Солнце, так как скорость убегания любых объектов, начиная со света, равна нулю и для выхода наружу им потребуется бесконечно большое время. Поэтому рассматриваемое издали Солнце будет представляться совершенно черным: маленький плавающий в пустоте черный шарик. Такой объект называют черной дырой.

Конечно, сжать свое Солнце мы пока не в состоянии. Но в широких просторах космоса существование подобных звездных объектов вполне вероятно. Например, в созвездии Лебедя наблюдают двой-

ную звезду, один из компонентов которой — огромная светящаяся обычная звезда, а второй, как полагают, — невидимая глазу черная дыра. Вывод о том, что второй компонент этой звездной системы — черная дыра, основан на характере поступающего оттуда рентгеновского излучения, для объяснения особенностей которого надо принять, что размеры второго компонента очень малы, а масса в 10 раз больше массы нашего Солнца.

В ньютоновой теории черные дыры не рассматривают; их открытие — решающий аргумент в пользу правильности общей теории относительности [21].

ГЛАВА 4 ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Сходство гравитационного и электромагнитного полей

Общая теория относительности — физическая теория, основанная на совершенно новом понимании гравитационного поля как геометрического свойства пространства-времени. Уже давно было осознано, что *гравитация универсальна*. Говоря так, имеют в виду следующее. Уже само прежнее название гравитации — «всемирное тяготение» — показывает, что любые весомые (обладающие весом, тяжестью) тела, будь то слиток золота или камешек прибрежной гальки, — все без исключения создают в своей окрестности гравитационное поле, величина и конфигурация которого определяются только местоположением и весом тела, источника поля, и совершенно не зависят от материала, из которого тело изготовлено. И обратно, гравитационное поле оказывает на помещенное в него весомое тело действие, не зависящее от материала, из которого тело состоит: величина и направление действующей на тело силы тяжести зависит только от конфигурации поля в точке расположения тела и от веса последнего, но не зависит от вида вещества и всех прочих его свойств. Таким образом, гравитационное поле действует на помещенные в него тела универсальным образом, и все весомые тела единообразно создают вокруг себя гравитационное поле. Это свойство и называют универсальностью гравитации.

Данное определение универсальности относится к ньютоновой теории всемирного тяготения. Аналогичное свойство имеется и в общей теории относительности Эйнштейна: надо просто заменить слово «вес» словом «энергия». Тогда понятие универсальности в применении к общей теории относительности переформулируется следующим образом: если нечто имеет энергию, то независимо от того, в каких формах находится энергия, и от остальных свойств этого «нечто» вся заключенная в нем энергия является источником гравитационного поля; и обратно, энергия испытывает действие гравитационного поля.

Так определяется универсальность гравитации в общей теории относительности.

Если стать на релятивистскую позицию, то есть признать, что гравитация диктует геометрию пространства-времени, то с приведенным определением универсальности легко согласиться. Еще легче уяснить себе универсальность, если вспомнить поясняемую рис. 18 аналогию с куском стекла. Непосредственной причиной преломления света в стекле является деформация последнего. Деформация вызвана попавшим в стекло инородным включением, но распределение деформации зависит не от материала включения, а только от его размера и формы. Тем самым моделируется ситуация с гравитационным полем, состояние которого зависит только от веса и местоположения тела — источника поля.

Похожее свойство универсальности обнаруживается также и у электрического поля. Заряженное тело создает вокруг себя электрическое поле, конфигурация и величина которого определяются только величиной, знаком и положением электрического заряда тела и совершенно не связаны с видом вещества носителя заряда и другими его свойствами [22]. Обратно, действие электрического поля

на помещенное в него заряженное тело определяется лишь величиной и знаком заряда тела, а также конфигурацией электрического поля в месте расположения тела, но не веществом тела и не другими его свойствами.

Короче говоря, любое тело, имеющее электрический заряд, испытывает действие со стороны электрического поля и само создает электрическое поле в окружающем пространстве. Это универсальность электрической силы.

Между рассмотренными видами сил есть и другие черты сходства. Например, и сила тяжести, и электрическая сила обратно пропорциональны квадрату расстояния от источника поля. Поэтому уже давно многие думали, что между обоими видами полей есть глубокая связь. Нельзя ли, основываясь на поразительном сходстве этих полей (универсальность!), по-новому взглянуть на электромагнитное поле как на поле того же типа, что и гравитационное?

В начале нашего века, до 20-х гг., было известно всего два вида фундаментальных полей: гравитационное и электромагнитное. Своеобразие гравитационного поля удалось очень красиво представить как геометрическую характеристику пространства-времени — кривизну. Естественна попытка аналогичного подхода и к другому фундаментальному полю — электромагнитному. Если по-настоящему проникнуться мыслью о сходстве этих полей, то не покажется удивительным, что сразу же вслед за работой Эйнштейна началась работа по реализации потенциальной возможности общего подхода к фундаментальным полям. В научной атмосфере того времени ощущалось, что вот-вот кто-то эту возможность осуществит. Поэтому после создания Эйнштейном общей теории относительности все гении века занялись такими попытками.

Единый подход к гравитационному и электромагнитному полям как геометрическим характеристикам пространства-времени получил тогда название единой теории поля [23]. Первый ее вариант опубликован в 1918 г. немецким математиком Вейлем. Предложенная Вейлем схема получила название калибровочной теории; она — прообраз современной теории калибровочных полей. Поэтому ниже мы посвятим специальную главу более подробному рассмотрению теории Вейля, а сейчас мне не хотелось бы вдаваться в нее особенно глубоко.

Как ясно из сказанного, единые теории поля в максимальной мере используют всевозможные геометрические свойства пространства. Чтобы создавать на этой основе теории, надо иметь обширные познания в геометрии и способность умело с ними обращаться — иными словами, нужно быть математиком. Вейль — крупнейший математик нашего века, имевший к тому же основательные познания в физике и философии: глубину его понимания теории относительности демонстрирует написанный им учебник «Пространство, время, вещество» [24]. Поэтому естественно, что после создания Эйнштейном общей теории относительности Вейль первый опубликовал работу по единой теории поля [25].

Здесь мы позволим себе небольшое отступление. В предисловии к упомянутому учебнику Вейль писал, что видит свою задачу в демонстрации на примере теории относительности истинного метода теоретической физики, который, по мысли Вейля, заключается в обработке средствами математики результатов осмысления экспериментальных фактов и философского анализа проблем. Учебник Вейля — обработка лекций, прочитанных им в Федеральном политехническом институте города Цюриха (Швейцария). Глубоко содержательную, прекрасно написанную, всемирно известную книгу

Вейля по достоинству можно назвать шедевром. В ней, правда, встречаются трудные для понимания места. Даже такой великий физик, как Гейзенберг (о нем еще будет речь ниже), говорил, что, когда в старших классах школы он читал книгу Вейля, ее непонятные места сильнее всего врезались ему в память. Пусть это воспоминание Гейзенберга послужит утешением читателю, если он обнаружит, что понял в книге Вейля от силы половину.

Расширение эйнштейновского пространства-времени

Вернемся к теме нашего повествования. По принятой в математике классификации пространств пространство-время, использованное Эйнштейном для геометрической интерпретации гравитационного поля, является четырехмерным римановым пространством. Римановы пространства введены в математику немецким ученым середины XIX в. Риманом. Евклидово пространство — очень специализированный частный случай риманова пространства. Пространство-время частной теории относительности напоминает четырехмерное евклидово пространство, но все же отличается от него; поэтому, строго говоря, его называют псевдоевклидовым пространством. Разумеется, оно — тоже один из примеров риманова пространства частного вида. Таким образом, мы видим, что римановы пространства весьма разнообразны.

Итак, пространство-время частной теории относительности — одна из разновидностей псевдоевклидова пространства. Его геометрические свойства (структура), так же как и евклидова пространства, чересчур просты: даже если в каждую его точку и поместить силу тяжести, мы не найдем в псевдоевклидовом пространстве степеней свободы, при помощи

которых можно описать произвольное изменение величины и направления этой силы при переходе от одной точки к другой. Модель риманова пространства общей теории относительности имеет достаточно степеней свободы, для того чтобы включить в свою структуру гравитационное поле, произвольно изменяющееся от точки к точке по величине и направлению.

Однако оказывается, что все степени свободы этой модели риманова пространства без остатка тратятся на описание гравитационного поля; лишних не остается. Это естественно, так и должно быть. В противном случае какая-то часть геометрических свойств пространства осталась бы без применения, а это означало бы, что общая теория относительности как теоретическая схема неполна. Недоиспользованные свойства пространства оказались бы несвязанными с состоянием гравитационного поля, то есть не имели бы ни прямого, ни косвенного отношения к веществу и электромагнитному полю. Иначе говоря, неиспользованные свойства не определялись бы физическими законами, но тем не менее присутствовали бы в выражениях этих законов. Что это, как не указание на неполноту теории? Этим и объясняется, почему в эйнштейновской модели пространства-времени не должно оставаться (и не осталось) лишних, неиспользованных степеней свободы.

По указанной причине надо было как-то расширить эйнштейновскую модель пространства-времени, для того чтобы в каждой его точке появились степени свободы, которые можно было бы сопоставить электромагнитному полю. Разные варианты единой теории поля различаются способами такого расширения.

В самой первой, предложенной Вейлем, теории в качестве принципа было выдвинуто утверждение,

что на физических законах не сказывается замена в каждой точке масштаба длины, равного одному метру, на другой масштаб; иначе говоря, физические законы инвариантны относительно замены масштабов. При этом допустимыми считаются не только однородные преобразования масштабов, с одинаковым по всему пространству-времени отношением длин, но и неоднородные замены с изменяющимся от точки к точке отношением. Такую замену масштабов называют масштабным, или калибровочным, преобразованием. Пользуясь этим термином, утверждение Вейля можно выразить словами: *физические законы инвариантны относительно произвольных калибровочных преобразований*. На этом основании вейлев вариант единой теории поля называют также калибровочной теорией Вейля.

В теории Эйнштейна физические законы не зависят от выбора системы отсчета, использованной для наблюдения физических явлений. Это общая теория относительности. Но в ее рамках масштабы длины (и времени) не зависят ни от состояния движения наблюдателя, ни от времени и места наблюдения.

Вейль принимает, что вторая из упомянутых в предыдущем абзаце характеристик наблюдательной процедуры (масштабы в каждой точке) равноправна с первой характеристикой (система осей координат в каждой точке). Для реализации первого из требований предыдущего абзаца потребовалось в каждую точку псевдоевклидова пространства частной теории относительности добавить новые степени свободы, в результате чего оно заменилось эйнштейновской моделью риманова пространства; аналогично для реализации требования Вейля в каждую точку риманова пространства общей теории относительности пришлось ввести дополнительные степени свободы (масштабы). По-

строенная таким путем модель пространства получила название *пространства Вейля*. Понятно, что добавленные при его построении степени свободы использовались Вейлем для представления электромагнитного поля.

Теория Вейля, действительно, глубоко интересна, в ней много поучительного. Но, как подробно объясняется в дальнейшем, она не нашла непосредственного приложения к описанию реальности.

Теории с пятью измерениями

Были предложены также варианты единой теории поля, в которых вместо четырехмерного рассматривалось пятимерное риманово пространство, получаемое из четырехмерного добавлением еще одного измерения. Впервые теорию с пятью измерениями предложил Калуца. Его идея заинтересовала многих, даже Эйнштейн, по-видимому, кое-что извлек из статьи этого автора. Особенно энергично идею Калуцы развивал Клейн. Поэтому соответствующую теорию называют теорией пятимерия Калуцы—Клейна.

Чтобы конкретнее представить себе новое (пятое) измерение, по-моему, лучше всего принять, что к обычному времени добавлено еще одно, сосуществующее с первым, время, которое называют пятой координатой. Обычно для точного описания какого-либо события надо указать три пространственные координаты и четвертую координату — время (например, воспользоваться сигналом точного времени, подаваемым астрономической обсерваторией). Для указания места случившегося на Земле события достаточно, например, сообщить его широту, долготу и высоту над уровнем моря; эти данные по порядку называют первой, второй и третьей координатами события. Число, обозначающее момент вре-

мени, называют четвертой координатой. С обычной точки зрения для характеристики события совершенно достаточно этих четырех чисел. А по Калуце, необходима еще какая-то информация и о пятой координате события.

В теории Калуцы допускается, что у двух наблюдателей *A*, *B*, занимающих одну и ту же обычную (четырёхмерную) пространственно-временную точку *P*, могут различаться регистрируемые ими пятые координаты, то есть моменты «нового времени». В реальном мире это невозможно. Чтобы устранить расхождение между своей теорией и опытом, относящимся к реальному миру, Калуца придумал следующую отговорку.

Он утверждает, что в нашем пространстве-времени можно так удачно выбрать систему отсчета, что при наблюдении из нее физических явлений мы совершенно не будем замечать существование пятой координаты. Чтобы облегчить восприятие этой идеи, полезен следующий наглядный образ.

Вернемся к четырехмерному пространству-времени и сначала вообразим, что мы наблюдаем окрестности, остановившись в очарованном городе-призраке: все вокруг, включая Солнце, неподвижно, даже наше собственное сердце не бьется. Среди этого оцепенения мы, наверное, не сможем ощутить бег времени. А затем представим себе, что мы смотрим из окна идущего поезда: мы отчетливо воспринимаем ход времени по мельканию, убегающего назад пейзажа.

Положения любых предметов в городе-призраке не зависят от времени, они всегда одни и те же, определены и неизменны. Потому мы и не чувствуем существования времени. Самое важное в этом эпизоде можно выразить словами: подлинный источник нелепой ситуации, когда не ощущается время,— существование ледящего душу города-призрака,

в котором все, начиная с Солнца, недвижно, даже собственное сердце не стучит.

Точно так же и в случае пятимерного пространства-времени наблюдатель не почувствует существования пятой координаты, если он находится в системе отсчета, помещенной в город-призрак, в котором четырехмерные положения любых предметов никак не связаны с пятой координатой («новым временем»). Упомянутая отговорка Калуцы сводится к утверждению, что совершенно случайно окружающее нас пятимерное пространство-время оказалось таким городом-призраком, и, к счастью, мы привыкли пользоваться этой чрезвычайно удобной системой отсчета. Поэтому, хотя мы и живем на самом деле в пятимерном пространстве-времени, мы не замечаем существования пятой координаты.

На первый взгляд отговорка Калуцы — произвольное утверждение, но мы не будем ее обсуждать, а покажем, что если встать на точку зрения Калуцы—Клейна, то электромагнитное поле аналогично гравитационному можно истолковать как геометрическое свойство пятимерного пространства-времени. Для этого надо обсудить законы движения тел. Начнем со случая общей теории относительности.

Поскольку в ней пространство-время (являющееся вместилищем для тел) четырехмерно, закон движения тела описывается четырьмя уравнениями. Первые три из них показывают, как изменяются с течением времени (возрастают или уменьшаются) проекции скорости тела (например, проекции на направления запад—восток, север—юг и вертикальное). Четвертое уравнение описывает возрастание кинетической энергии тела при его падении в поле тяжести (закон сохранения энергии).

В случае Калуцы—Клейна пространство-время пятимерно и движение тела описывается пятью урав-

нениями. Четыре из них почти не отличаются от четырех уравнений движения в общей теории относительности: единственное отличие в том, что в теории Калуцы и др. на тело, кроме силы тяжести, действует еще сила со стороны электромагнитного поля. Иными словами, в этой теории удастся естественно ввести действие на тело не только со стороны гравитационного, но и электромагнитного поля. Тем самым осуществляется первоначальный замысел единой теории поля, что, несомненно, относится к достоинствам теории Калуцы.

Ее достоинства этим не ограничиваются: оставшееся уравнение для пятой координаты показывает, что при движении тела в гравитационном и электромагнитном полях его электрический заряд не увеличивается и не уменьшается (остается неизменным), пока тело не соприкасается с другими телами. Это — закон сохранения электрического заряда, один из основных законов электродинамики.

Читателю может показаться, что теория Калуцы—Клейна действительно великолепна, но это не так. В этой теории остается одно неиспользованное геометрическое свойство пространства-времени, которое никак не связано ни с гравитационным, ни с электромагнитным полем. Совершенно непонятно, какую характеристику реального мира должно это свойство выражать. Как ни старался Клейн придать ему какой-нибудь смысл, из его попыток в конце концов ничего не вышло.

Неудача Клейна имеет глубокую причину. Источником успешности геометрической интерпретации силы тяжести при создании общей теории относительности было то, что Эйнштейн нашел мощный руководящий принцип, которому он неотступно следовал, — основанный на хорошо проверенном экспериментальном факте принцип эквивалентности, утверждающий, что инертная и тяготеющая массы

любых тел пропорциональны (можно сказать, равны) друг другу. А в случае электромагнитного поля не видно, почему необходимо настаивать на его геометрическом толковании. Было только одно основание для попыток геометризации электромагнитного поля: получающаяся при этом теория с формальной точки зрения более красива. Для решения же вопроса о том, какой реальной физической величине сопоставить упомянутое выше неиспользованное геометрическое свойство, не обнаружили не только руководящего принципа, но и слабого намека на него.

К тому же аргументация, обосновывающая недоступность нашему восприятию пятого измерения (отговорка Калуцы), тоже выглядит приспособленчески, ей не хватает убедительности. Поэтому теория Калуцы—Клейна потихоньку сошла со сцены [26].

Упадок единых теорий поля

Вслед за Калуцей и Клейном многие публиковали аналогичные работы; предпринимались также попытки улучшить теорию Калуцы—Клейна. В частности, некоторые пробовали тем или иным способом изгнать из теории неизвестную пятую координату. Подобные работы были и у Эйнштейна, который после завершения общей теории относительности, спасаясь от преследований нацистов, переехал в США (1933) и занял должность профессора в Принстонском институте высших исследований. С тех пор до конца своих дней Эйнштейн с головой погрузился в работу над едиными теориями поля. К сожалению, эти его усилия успеха не имели, хотя выдвинутые им в процессе работы идеи с математической точки зрения были очень интересны и нашли применение в областях, далеких от первоначальной цели — единой теории поля.

Попробую подвести здесь итог первого периода

развития единых теорий поля, который к настоящему времени уже завершен. Все эти теории, бросая вызов нашему повседневному опыту, приписывают четырехмерному риманову пространству (вблизи Земли это риманово пространство чрезвычайно напоминает евклидово, отклонения от евклидовости столь малы, что их почти невозможно обнаружить) дополнительные геометрические свойства в надежде использовать их для представления электромагнитного поля. Поэтому, с одной стороны, надо каким-то образом сделать так, чтобы добавленные свойства пространства-времени количественно были бы очень малы, в противном случае теория войдет в противоречие с опытом.

Но, с другой стороны, добавленные геометрические свойства не должны быть слишком малыми: ведь само их существование должно быть прямо или косвенно связано с существованием электромагнитного поля, которое мы, естественно, воспринимаем. Чтобы совместить эти два противоположных требования, надо ответить на вопрос: почему мы не ощущаем существования дополнительных свойств пространства-времени? Ответ на него искали как на пути совершенствования математического искусства, так и в сфере правдоподобных физических оправданий. На усилия по созданию единой теории поля была затрачена огромная энергия. Скромность полученных результатов объясняется тем, что сторонникам представления электромагнитного поля в виде геометрического свойства пространства-времени недоставало подтвержденного опытом руководящего принципа, подобного принципу эквивалентности.

В самом деле, с аналогичным затруднением столкнулся уже Эйнштейн при попытках представить гравитационное поле как геометрическую характеристику пространства. Действительно, тысячелетний опыт подсказывал человечеству, что окружающее его

на Земле пространство почти на сто процентов евклидово. Идея же Эйнштейна состояла в том, что в присутствии гравитационного поля пространство описывается неевклидовой геометрией.

На первый взгляд такое требование противоречиво, но Эйнштейн, опираясь на поддержку мощного союзника — принцип эквивалентности, смело бросил вызов здравому смыслу. К счастью, оказалось, что утверждение Эйнштейна не противоречит опыту. Причину этого мы уже рассматривали в третьей главе при обсуждении отклонения света: неевклидовость нашего пространства слишком мала, и мы не в состоянии ее ощутить.

Такая удача объясняется тем, что земное гравитационное поле слишком слабо, а скорость света чересчур велика. Поэтому общая теория относительности не только не противоречит опыту, а, наоборот, ее правильность подтверждается им. Если бы сила тяжести была очень большой (например, если бы мы жили в непосредственной окрестности черной дыры), то нам с самого начала, несомненно, и в голову не пришло бы считать свое пространство евклидовым.

А теперь вернемся к единым теориям поля. Из сказанного понятно, что при их исследовании необходимы математические, в основном геометрические, знания. Необходимость в таких знаниях становится еще острее, если придерживаться точки зрения, что выход из указанного выше противоречия, возникающего, когда пространство наделяют избыточными геометрическими свойствами, надо искать на пути математических ухищрений. Поэтому в исследованиях по единым теориям поля в основном участвовали математики и сильные в математическом отношении физики.

Предмет исследования все больше смещался от первоначальных физических проблем в сторону проблем математических. Физики постепенно отходили

от этой проблематики; она все более изолировалась и замыкалась сама на себя.

В то же время стремительно развивалась, опираясь на колоссальный эмпирический материал, квантовая теория, которая родилась почти одновременно с теорией относительности; развитие квантовой теории увенчалось созданием в 1925 г. квантовой механики, для формулировки которой использовались математические методы, в корне отличные от методов, применявшихся в ньютоновой механике и теории относительности. Эта новая механика с наибольшей силой обнаружила свою мощь при изучении структуры вещества; оказалось, что ее понятия применимы не только к чисто механическим явлениям, но и к свету и вообще электродинамике. Поэтому все физики мира, особенно юные гении и талантливая молодежь, ставившие своей целью создание и развитие новой науки, сосредоточили внимание на проблемах квантовой физики. Число интересующихся едиными теориями поля все падало, и в конце концов остались всего две-три научные школы, занимавшиеся проблемами общей теории относительности и единой теорией поля. Ею занимались перевалившие на вторую половину жизни старики, а интересующихся этой темой молодых людей «физическое» общественное мнение третировало как оригиналов со странностями, людей не от мира сего.

Например, когда я окончил университет и позже, на заседаниях японского физического общества сообщения по общей теории относительности и единой теории поля всегда сдвигали в самое начало утренней программы. Это объяснялось «родительскими чувствами» председательствующего, который заботился о том, чтобы не желающие слушать такие доклады не страдали, если они опоздают на заседание. Рассказывают, что в особенно тяжелых слу-

чаях в девять часов на утреннем заседании, кроме первого докладчика и председательствующего, в зале находилось всего два-три человека. Соль этой истории в том, что немногочисленные присутствующие в зале — тоже докладчики, пришедшие на свои доклады, так что в действительности слушатели совсем отсутствовали. Возможно, что это шутка, но суть в том, что работы по единой теории поля встречали настолько холодный прием, что стали возможными даже такие шутки.

Я говорил уже, что с середины 20-х гг. все способные ученые сосредоточились на изучении и развитии квантовой физики. Что бы ни говорили вокруг, а в глубине души я считал себя талантливым, поэтому, разумеется, тоже специализировался по квантовой физике. Но (какое несчастье!) я имел еще интерес к теории относительности и единой теории поля, настолько сильный, что не мог бросить эти занятия. Конечно, заниматься этими вещами открыто, официально означало самому себе наклеить ярлык человека «с приветом», странного оригинала. В то время я был холост, и подобная репутация очень затруднила бы мне вступление в брак. В таких обстоятельствах невозможно было не хранить в глубокой тайне свое увлечение единой теорией поля. Глядя на современный расцвет этой теории, никак не можешь отделаться от впечатления, что наступила поистине новая эпоха.

ГЛАВА 5 РАСЦВЕТ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

XX в. в истории физики — золотой век расцвета, быстрого, скачкообразного развития. На протяжении жизни всего одного поколения созданы две революционные теории — относительности и квантовая, в корне преобразовавшие основы физики, неизменные со времен Ньютона. С теорией относительности мы уже познакомились, а сейчас поговорим о квантовой теории.

Первый шаг на пути построения квантовой теории сделал немецкий физик Планк, но развил идею Планка таким образом, что обозначилось направление к современной теории элементарных частиц, не кто иной, как Эйнштейн. Поэтому, я думаю, не будет преувеличением сказать, что Эйнштейном заложены основы физики XX в.

В конце XIX в. физиков беспокоили две нерешенные проблемы: определение абсолютной скорости Земли и объяснение свойств теплового излучения. Первую из этих проблем мы подробно обсудили во второй главе, она полностью решена частной теорией относительности. Для решения второй проблемы Планк предложил квантовую гипотезу, которая и стала отправным пунктом развития квантовой физики.

Проблема теплового излучения

Сначала поясним, что такое тепловое излучение. Представим себе кусок железа. Если немного подогреть его на огне, вынести железо из пламени и приблизить к нему снизу ладонь, то рука ощутит идущее от железа тепло. Это — испускаемое железом в пространство невидимое тепловое излуче-

ние, представляющее собой разновидность электромагнитных волн. Если продолжать нагревание железа, оно вскоре покраснеет, при дальнейшем повышении температуры станет испускать желтый свет. Если его нагреть еще сильнее, испускаемый свет станет белым, а при очень сильном нагревании — бело-голубым.

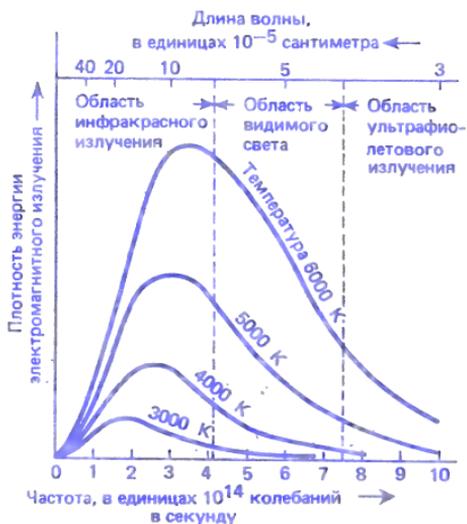
Итак, железо, а говоря более общо, — физическое тело, при нагревании испускает свет и другие электромагнитные волны. Это явление называют тепловым излучением.

Тепловое излучение состоит из смеси электромагнитных волн с разной длиной волны, от самых длинных до коротких. Постепенное изменение цвета тела при его нагреве, подробно описанное в предыдущем абзаце, позволяет понять, что при низкой температуре тело испускает в основном длинные электромагнитные волны; такое излучение называют инфракрасным. По мере нагрева длина волны излучения становится короче: изменение цвета от красного к белому и бело-голубому объясняется этой причиной. Итак, при изменении температуры изменяются как пропорции, в которых смешаны электромагнитные волны разной длины волны, так и общее количество излучения; последнее растет с повышением температуры.

Вообразим теперь, что в куске железа есть полость, внутри которой (для простоты рассуждения) находится вакуум. При нагреве железо испускает электромагнитные волны не только в окружающее пространство, но и внутрь полости. В полости электромагнитные волны распространяются прямолинейно; достигнув противоположной стенки, они частично поглощаются железом, а частично отражаются назад в полость, которая, таким образом, до предела заполняется беспорядочно мечущимся электромагнитным излучением.

Регулируя нагрев железа, можно добиться, чтобы оно находилось при постоянной температуре. Количество электромагнитной энергии, испускаемой в полость, сначала будет нарастать, но параллельно будет увеличиваться и поглощение этой энергии стенками полости; в конце концов наступит равновесие, при котором количество электромагнитной энергии, отдаваемой стенками в полость, сравняется с количеством энергии, поглощаемой стенками из полости. Важно заметить, что такое равновесие установится для электромагнитного излучения каждой длины волны. Это значит, что при определенной температуре каждой длине волны будет соответствовать свое определенное количество электромагнитной энергии, запасенной в виде излучения в полости. Зависимость равновесного количества эле-

Рис. 19. Зависимость плотности энергии электромагнитного излучения в полости от длины волны



электромагнитной энергии в полости от длины волны при данной температуре показана графически на рис. 19.

На горизонтальной оси этого графика отложена длина волны (верхняя шкала) или частота (нижняя шкала) электромагнитного излучения. При смещении вдоль горизонтальной оси вправо длины волн становятся короче, а частота увеличивается. На вертикальной оси отложена спектральная плотность энергии электромагнитного излучения в полости, то есть заключенная в одном кубическом сантиметре полости энергия излучения с данной длиной волны. Приведены четыре кривые, соответствующие каждой постоянной температуре в интервале от 3000 до 6000 градусов. Например, вторая снизу кривая отвечает температуре 4000 градусов. Площадь, заключенная между этой горбатой кривой и нижней горизонтальной осью, равна полной энергии излучения всех длин волн при температуре 4000 градусов, отнесенной к одному кубическому сантиметру объема полости.

При рассмотрении рис. 19 обратите внимание на следующие три свойства кривых: первое — площадь под данной кривой, иначе говоря, полная энергия электромагнитного излучения при данной температуре, заключенная в одном кубическом сантиметре полости, увеличивается с ростом температуры; второе — энергия электромагнитного излучения с данной длиной волны (спектральная плотность энергии) тоже возрастает с ростом температуры; третье — длина волны, соответствующая максимуму кривой (то есть та длина волны, при которой плотность электромагнитной энергии для данной температуры самая большая) сдвигается при увеличении температуры вправо (в область коротких длин волн).

Изменение цвета нагретого куска железа от красного к бело-голубому объясняется третьей особенностью спектральных кривых рис. 19 (третье свой-

ство), а увеличение яркости свечения — первой и второй особенностями (первое и второе свойства).

Неискушенный читатель может подумать. «Ну и что? Какая нам от этого польза?» Он будет неправ. Эти кривые применяют для измерения температуры очень сильно нагретых тел, когда бесполезен ртутный термометр, например кусков металла в плавильной печи. Более того, с их помощью можно определить температуру далеких раскаленных объектов, к которым невозможно приблизиться, таких, как Солнце и звезды.

Практические применения, конечно, существенны, но в свое время намного важнее оказалось то, что вид подобных кривых не зависит от свойств окружающего полость вещества (в рассмотренном нами примере это было железо) и от состояния стенок полости; форма кривых определяется только температурой стенок. Таким образом, кривые показывают, как распределена по длинам волн энергия электромагнитного излучения в полости при данной температуре.

Гипотеза квантов и фотоны

В конце XIX в. проблему теплового излучения понимали как задачу о теоретическом выводе (с позиций физики того времени) эмпирических зависимостей, подобных кривым, показанным на рис. 19*.

Среди различных попыток решения этой проблемы самыми известными были две теории: предложенная немецким физиком Вином и разработанная английскими учеными Рэлеем и Джинсом. Формула Вина хорошо описывала экспериментальные данные для коротких длин волн, а формула Рэлея—Джинса

* Кривые рис. 19 на самом деле построены при помощи теоретической формулы Планка, но получаемые на опыте кривые имеют в точности такой же вид. — *Прим. авт.*

согласовывалась с экспериментом в длинноволновой области. Но при других длинах волн каждая из этих теорий резко противоречила опыту.

Теоретическое объяснение кривых (рис. 19) впервые удалось Планку. Поясним основную идею Планка при помощи сравнения.

Если для поднятия уровня воды в ванне у нас нет иного средства, как бросать туда мелочь из своего кошелька, то мы не сможем осуществить непрерывный подъем уровня, так как самая маленькая монета — иена. Нельзя опустить в ванну пол-иены, потому что монет такого достоинства в Японии нет.

Планк предположил, что похожая ситуация возникает для энергии электромагнитных волн в полости. Точнее говоря, он принял, что для электромагнитных волн с частотой ν минимальная порция энергии по величине пропорциональна ν ; энергия электромагнитных волн может изменяться только скачками, увеличиваясь или уменьшаясь на целое число таких порций*.

Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии гипотезы квантов: в 1905 г. он ввел понятие кванта света (фотона). Фактически Эйнштейн утверждал, что свет (вообще электромагнитное поле) имеет двойственную природу: в одних случаях он выступает как волны, а в других — как частицы. Когда свет ведет себя подобно волнам, он подчиняется уравнениям Максвелла. А когда он обнаруживает свои корпускулярные свойства, его можно рассматривать как газообразное тело, состоящее из частиц, названных Эйнштейном фотонами. Свет, представляющий собой с волновой точки зрения волны с частотой ν , с корпускулярной точки зрения проявляется как

* 14 декабря 1900 г. М. Планк доложил в Немецком физическом обществе о своем теоретическом выводе закона излучения. — *Прим. ред.*

ансамбль (газ) частиц-фотонов, энергия каждого из которых пропорциональна ν . Поскольку цвет видимого света определяется его частотой ν , фотоны частоты ν имеют цвет, соответствующий этой частоте. Так, зеленый свет может вести себя как набор «зеленых» фотонов.

По корпускулярной теории испускание и поглощение света стенками полости означает, что в полости рождаются и исчезают целочисленные количества фотонов той или иной частоты. С этой точки зрения гипотеза Планка об изменении энергии электромагнитных волн в полости выглядит очень естественной.

Идея Эйнштейна о фотонах — не пустая игра воображения. Впоследствии действительно обнаружили эффекты, которые впервые удалось понять с помощью этой гипотезы [27]. Таким образом, двойственная (корпускулярная и волновая) природа света (вообще электромагнитного поля) — неопровержимый факт.

Строение атомов

Все окружающие нас тела в конечном итоге построены из мельчайших частиц, называемых атомами. Атомы определенным образом соединяются в молекулы и упорядоченные объединения атомов или молекул — кристаллы, соединения маленьких кристалликов образуют скалы и другие горные породы, таким образом из атомов и молекул строятся всевозможные тела. В жидкостях и газах молекулы движутся свободно; различие между ними сводится к различию плотностей частиц и меры свободы молекулярного движения.

Следовательно, изучение строения атомов — первый шаг к изучению структуры вещества. Не удивительно, что в конце прошлого и начале нынешнего веков не было недостатка в гипотезах на этот счет.

Самой известной и выдержавшей испытание временем (с учетом исправлений, внесенных квантовой теорией) была гипотеза, высказанная в 1903 г. японским физиком Нагаокой. Поскольку восемь лет спустя с аналогичным предложением выступил английский ученый Резерфорд, в настоящее время эту гипотезу называют гипотезой Нагаоки — Резерфорда [28].

По этой гипотезе атом напоминает Солнечную систему. Роль Солнца отводится находящемуся в центре атома маленькому положительно заряженному ядру, вокруг которого, подобно Земле, Марсу и другим планетам, обращаются отрицательно заряженные частички — электроны. Диаметры орбит электронов согласно эксперименту составляют величины около одной стомиллионной (10^{-8}) доли сантиметра.

Вещество образовано различными комбинациями 92 химических элементов, таких, как водород, кислород, железо и т. д. Соответственно имеется 92 вида атомов: атом водорода, атом кислорода и т. п. Среди них самый простой — атом водорода, в котором вокруг ядра обращается единственный электрон.

Атомные ядра очень разнообразны, во всяком случае они различаются у разных атомов. Ядра состоят из частиц двух видов — протонов и нейтронов, сильно связанных в ядре. Электрический заряд протона положителен, а нейтрона — равен нулю. За исключением различия в величине электрического заряда, все остальные свойства этих частиц, начиная с массы, очень близки. Поэтому протон и нейтрон родственны друг другу; их называют общим именем — нуклоны.

Нуклоны и электроны — микроскопические частицы, размер которых (радиус) равен примерно одной 10 000-миллиардной доле (10^{-13}) сантиметра [29]. Но масса нуклона приблизительно в 1800 раз

больше массы электрона. Поэтому не будет большой ошибкой считать, что вся масса атома сосредоточена в его ядре.

Уже говорилось, что есть много типов атомных ядер. Они различаются полным числом нуклонов и числом протонов. В нормальном состоянии атома число электронов, вращающихся вокруг ядра, равно числу протонов в ядре, поэтому положительные и отрицательные заряды в атоме взаимно компенсируются, и со стороны атом выглядит электронейтральным. В атоме водорода ядро — просто один протон. В ядре атома урана-238 нуклоны сконденсированы наподобие виноградин в плотной виноградной грозди; среди них 92 протона, остальные — нейтроны.

Согласно сказанному материал, из которого построено все окружающее нас вещество и мы сами, — это нуклоны (протоны и нейтроны) и электроны. Если бы удалось аккуратно разобрать вещество на составные части, то мы получили бы «порошок» из частиц этих трех видов. Поскольку из них образовано любое вещество, они получили название «элементарных частиц».

В модели атома Нагаоки отрицательно заряженные электроны вращаются вокруг положительного ядра по круговым (эллиптическим) орбитам. Если на такую орбиту взглянуть сбоку, станет ясно, что электрон колеблется; согласно электродинамике Максвелла колеблющийся электрический заряд излучает в окружающее пространство электромагнитные волны (свет). Свет уносит энергию, вращение электрона замедляется, центробежная сила ослабевает, баланс между центробежной силой и силой притяжения ядра нарушается, и электрон практически мгновенно падает на ядро. Это означает смерть электрона, а с ним и атома. Подобный вывод находится в вопиющем противоречии с реальностью,

так как реальные атомы существуют практически вечно. Таким образом, предсказываемая моделью Нагаоки смерть атомов является «смертельным недостатком» самой модели.

Модель атома, предложенная Нильсом Бором

Для устранения недостатка планетарной модели датский физик Нильс Бор ввел в нее ограничения, получившие название квантовых условий; ограничениям подчиняются орбиты, по которым электрон может вращаться вокруг ядра. По мысли Бора, устойчивы только орбиты, удовлетворяющие квантовым условиям; при движении по устойчивой орбите электрон, несмотря на колебания заряда, не излучает электромагнитные волны, его энергия сохраняется, и он может пребывать на орбите сколь угодно долго. Излучение же (или поглощение) света атомом происходит при перескоках электрона с одной устойчивой орбиты на другую; при перескоке электрон отдает (или поглощает) порцию энергии — квант. Такая модель известна как атом Бора [30].

Принятая Бором картина испускания и поглощения света атомами согласуется с учением Эйнштейна о фотонах. В модели Нагаоки электрон, непрерывно излучая свет при движении по орбите, постоянно приближается к ядру и в конце концов захватывается последним. Пусть читатель простит меня за вульгарное сравнение, но у электрона Нагаоки был «энергетический понос» — болезнь, не только смертельная для атома Нагаоки, но и противоречащая эйнштейновской теории фотонов. Бор искусно устранил противоречие между моделью Нагаоки и учением о фотонах.

Своей моделью Бор прекрасно разъяснил взаимосвязь между стабильностью атомов и тайной рож-

дения света. Но физический смысл боровской модели был непонятен. Основное требование Бора о том, чтобы движущийся по стабильной орбите электрон, несмотря на колебания заряда, не излучал электромагнитные волны, выглядело как произвольное утверждение, противоречащее электродинамике. Особенно раздраженные критики Бора говорили, что его объяснение стабильности атома напоминает соединения бузины в огороде (модели атома Нагаоки) с дядькой в Киеве (квантовыми условиями) [31]. Спасли боровскую модель от упреков в непонятности дебройлевские «волны вещества».

Де Бройль постулировал, что элементарные частицы (из которых, как из материала, в конечном итоге строится все вещество), так же как и свет, имеют двойственную природу. Частице (произнося слово «частица», мы подчеркиваем корпускулярную сторону соответствующего двойственного микрообъекта; по традиции и сам этот микрообъект часто называют частицей) сопоставляется волна с частотой, пропорциональной энергии частицы. Энергия микрообъекта, рассматриваемого как корпускула, и частота того же объекта, рассматриваемого как волна, связаны таким же соотношением, каким, по Эйнштейну, связана энергия фотона с частотой последнего. В этом сущность дебройлевской идеи о волнах вещества.

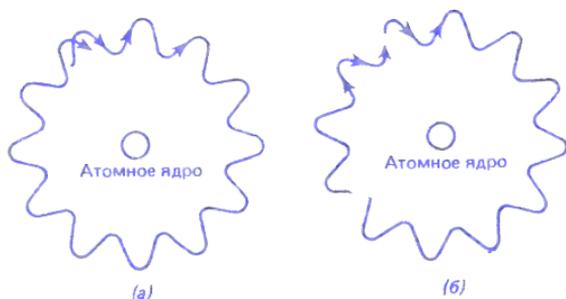
Во избежание ошибок в понимании дуализма волна—частица надо подчеркнуть: как у света, так и у частиц вещества мы не можем наблюдать одновременного проявления сразу и корпускулярных и волновых свойств. Двойственный микрообъект напоминает двуликого Януса: в каждой конкретной ситуации он показывает только одно из своих лиц — либо корпускулярное, либо волновое. Так, например, в случае электрона многие опыты легко понять, если считать, что электрон — частица, но встречаются

опыты, в которых невозможно разобраться, если не постулировать, что электрон — волна. В самом деле, почти все процессы в телевизионной трубке и в других подобных приборах легко объясняются с корпускулярной точки зрения (электрон — частица), но распределение следов на фотопластинке, оставляемых электронами, отраженными от кристалла, можно понять только с волновой точки зрения, полагая, что электроны — волны, аналогичные волнам рентгеновских лучей (рентгеновские лучи — разновидность электромагнитных волн). Подбирая условия опыта, можно добиться демонстрации либо волновых, либо корпускулярных свойств микрообъекта.

Однако если опыт поставлен так, что микрообъект ведет себя подобно волне, то его корпускулярная природа в таком опыте скрыта, не проявляется. Верно и обратное утверждение.

При движении электрона вокруг атомного ядра нельзя указать, в каком именно месте орбиты электрон находится. В этом случае электрон надо рассматривать не как частицу, а как волну, напоминающую туманное электронное облако в форме

Рис. 20. Дебройлевское объяснение стабильности атома Бора



бублика, окружающего атомное ядро. На рис. 20 схематически изображены соответствующие электронные волны. Если после обхода по кругу голова волны не совпадает с ее хвостом (рис. 20, а), то горбы и впадины волны накладываются друг на друга, взаимно ослабляются и волна сама себя гасит. Условие стабильности волны состоит в том, что ее голова после обхода по кругу точно подгоняется к хвосту (рис. 20, б). Для этого необходимо, чтобы на окружности укладывалось целое число длин электронных волн. Таково с волновой точки зрения условие стабильности электронного движения в атоме.

Оказалось, что условие стабильности дебройлевских орбитальных волн в точности совпадает с боровскими квантовыми условиями. Это примирило с последними почти всех критиков, ранее сетовавших на неясность физического смысла квантования орбит электрона в атоме.

Рождение квантовой механики

Говорят, что в жизни не знаешь, где найдешь, где потеряешь; то же самое относится и к физике. Ведь, казалось бы, как прекрасно: постулат де Бройля о том, что частицы вещества, подобно свету, имеют двойственную (корпускулярно-волновую) природу, полностью подтвердился на опыте и позволил дать блестящее теоретическое обоснование боровской модели атома [32]. Так нет же: представление о корпускулярно-волновом дуализме микроробъектов породило новые трудные вопросы.

Представим себе покачивающуюся на поверхности пруда лодку. Ясно, что вертикальные колебания воды разбегутся в виде волн по всему пруду,

а не локализируются вблизи лодки; такова природа волнового движения. Его можно локализовать на небольшом участке водной поверхности только за счет интерференции, возникающей при наложении волн разной длины волны (а значит, и разной частоты). При сложении волн, различающихся длиной волны, в каком-то месте суммарная волна может усиливаться из-за того, что горбы придутся на горбы, а впадины — на впадины, но зато в других местах вследствие различия в длинах волн условие усиления суммарной волны нарушится, горбы одной волны будут уже приходиться на впадины другой и складываемые волны погасят друг друга. Складывая соответствующим образом много волн с разной длиной волны, можно добиться, чтобы в какой-то момент времени результирующая суммарная волна сосредоточилась на маленьком участке водной поверхности.

То же самое относится к электрону. Пусть в ящике заперт электрон с некоторой определенной энергией. Соответствующая волна де Бройля распространяется по всему ящику, и нельзя сказать, в каком именно месте находится электрон. Для того чтобы электрон, подобно частице, занимал определенное место, надо, как и в примере с волнами на воде, сложить многочисленные электронные волны, различающиеся длиной волны, в волновой пакет, локализованный в небольшой области пространства ящика. Заметим, что общее свойство почти любых волн (свет в вакууме — исключение) состоит в том, что волны с разной длиной волны распространяются с разными скоростями. Поэтому для того, чтобы собрать электронные волны в маленький пакет, находящийся в данном месте, нужно сложить много электронных волн, различающихся длиной волны и скоростями распространения.

Положение электрона определится тем точнее,

чем уже волновой пакет. Сузить волновой пакет за счет интерференции можно только тогда, когда складывается большое число волн, сильно различающихся по длине волны. Таково условие локализации электрона в какой-то точке ящика в некоторый момент времени.

Но время не стоит на месте, и собранные в волновой пакет волны, естественно, будут двигаться каждая со своей скоростью, зависящей от длины волны; это приведет к «расплыванию» волнового пакета: с течением времени его размер будет становиться все больше. Соответственно все более неопределенным будет становиться положение электрона как частицы. Похожим образом развиваются соревнования по марафонскому бегу. Вначале бегуны стартуют плотной группой, но потом более быстрые вырываются вперед, медленные отстают, и цепочка бегунов все более растягивается. Движение пакета электронных волн — точная копия марафонского забега.

Итак, чем точнее мы локализуем волновой пакет (точнее задаем положение частицы), тем скорее он расплывается. Причина в том, что для более точной локализации разброс длин волн в пакете надо увеличить.

И обратно: уменьшить расплывание волнового пакета можно только за счет уменьшения различий смешиваемых в пакете волн. Но тогда не удастся сузить размер волнового пакета, то есть избежать того, чтобы положение электрона с самого начала задавалось неточно.

Подытожим сказанное. Если точно определена энергия (а значит, и скорость) электрона в ящике, то совершенно неизвестно, в каком месте ящика электрон находится. Если же не стремиться к уточнению скорости (или энергии) электрона, то можно в какой-то момент времени уточнить его положение.

При этом, правда, в последующие моменты времени знание положения электрона очень быстро теряется. Попытка предсказать местонахождение электрона похожа на попытку предвидеть положение «глаза» тайфуна на экране телевизора во время метеорологического репортажа из космоса: ясно только то, что в следующий момент «глаз» сместится куда-то в соседнюю точку. В случае электрона естественно считать, что вероятность его обнаружения в данном месте тем больше, чем плотнее здесь его волновой пакет (который, расплываясь со временем, становится в каждой точке все более разреженным).

То, что мы обсуждали выше, — действительно серьезный вопрос. Со времени создания механики Ньютоном физики были уверены, что для полного знания движения частицы (знания последовательности ее положений с течением времени) достаточно узнать положение и скорость частицы в начальный момент, так как все ее последующие положения точно предсказываются законами механики.

Но наше обсуждение показывает, что из-за двойственности природы электрона (дуализма волна—частица) невозможно в один и тот же момент времени точно указать его скорость и положение. Даже если мы в какой-то момент времени и узнали положение электрона, эта информация теряется в последующие моменты времени. Поэтому надо внести исправление в прежние законы физики, которые позволяли по начальным данным точно предсказать ситуацию в будущем, иначе говоря, изменить использованный в этих законах способ причинного описания природы. Выше уже отмечалось, что из неполных (с точки зрения ньютоновской физики) начальных данных мы в состоянии теперь делать только вероятностные предсказания, например предположить, что спустя такое-то время вероятность обнаружения

электрона в такой-то точке будет равна 75 процентам.

Рискуя показаться утомительным, я все же позволю себе еще раз по пунктам резюмировать сказанное. Первое. Необходимо исправить прежнюю механику с учетом двойственной природы электрона. Второе. Электронная волна с течением времени распространяется причинно, по законам распространения волн, но положение электрона как частицы нельзя предсказать точно, можно только указать вероятность того или иного положения. Третье. Чем плотнее в данном месте электронная волна, тем выше вероятность обнаружить там электрон.

Теория, в которой высказанные соображения нашли конкретное и точное математическое воплощение, получила название квантовой механики. В 1925 г. ее сформулировал двадцатичетырехлетний юноша, тогда еще студент, Гейзенберг, а годом позже независимую формулировку этой механики дал австрийский физик Шредингер. Две первоначальные формы квантовой механики сильно различались, и Шредингеру очень не нравилось мнение, что его механика тождественна механике Гейзенберга. Однако вскоре английский ученый Дирак строго доказал эквивалентность двух формулировок квантовой механики [33]. Затем пришло осознание вероятностного истолкования теории, после чего все физики мира сосредоточили свои усилия на изучении квантовой механики и применении ее к решению задач атомной физики.

Здесь уместно сделать небольшое отступление. Выше говорилось, что вследствие двойственности природы электрона ньютонова механика утратила силу. Но дело в том, что возникающие в связи с дуализмом волна—частица сложные вопросы относятся только к внутриатомному миру и миру элементарных частиц и не имеют отношения к окру-

жающей нас макроскопической действительности. Иначе говоря, в макромире по-прежнему эффективна ньютонова механика: доказано, что движение окружающих нас больших по микроскопическим масштабам тел описывается как квантовой, так и ньютоновой механикой совершенно одинаково.

Квантовая механика продемонстрировала свою мощь и добилась огромных успехов при решении задач атомной физики; это стимулировало ее применение к анализу устройства атомных ядер. Были предприняты также попытки пересмотреть электродинамику Максвелла, включив в ее формальную структуру двойственность природы света и электронов.

Первого большого успеха в перестройке электродинамики достиг уже упоминавшийся Дирак. Теорию Дирака обобщили Гейзенберг и Паули. Созданный в итоге раздел науки получил название — квантовая теория поля; несмотря на один свой крупный недостаток, она до настоящего времени продолжает быть библией для физиков, занимающихся элементарными частицами, так как является единственным в своем роде, незаменимым инструментом построения теории элементарных частиц.

ГЛАВА 6 ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Ядерные силы

Мы говорили уже, что атомные ядра построены из нуклонов, то есть протонов и нейтронов. Поскольку протоны имеют (положительный) электрический заряд, они отталкиваются друг от друга. Отталкивание это должно быть очень сильным, так как сила отталкивания обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами, а размеры ядер очень малы: от 10^{-13} до 10^{-12} сантиметра.

Электрический заряд нейтронов равен нулю. Поэтому между нейтронами, а также между нейтронами и протонами электрические силы не действуют. Значит, среди известных в то время сил единственным претендентом на роль силы, связывающей нуклоны в ядре, могла быть сила всемирного тяготения [34]. Но расчет показывает, что гравитационное притяжение нуклонов друг к другу ничтожно слабо, оно не в состоянии сдерживать отталкивание протонов. Получается, что нуклоны согласно знаниям того времени не могли быть сильно связаны в ядре. Куда там! Наоборот, они должны были бы со страшной силой разлететься во все стороны. Тем не менее, в действительности они очень крепко связаны друг с другом, образуя устойчивые атомные ядра. Отсюда следует, что в природе существуют какие-то новые, неизвестные ранее силы (их стали называть ядерными). Поскольку удовлетворительное теоретическое объяснение механизма действия этих сил впервые дал японский физик Юкава, эти силы называли также силами Юкавы.

Перенесемся мысленно в середину 1930-х годов и познакомимся с уже известными тогда из эксперимента отличительными особенностями ядерных сил.

Их величину можно представить себе, сравнив силу электрического отталкивания двух протонов в ядре с силой их ядерного притяжения. Оказывается, что при расстоянии между двумя протонами, равном примерно 10^{-13} сантиметра (среднее расстояние между нуклонами), ядерная сила притяжения приблизительно в 40 раз больше силы электростатического отталкивания протонов. На этом основании ядерные силы называют *сильными* и говорят о *сильном взаимодействии* между нуклонами. Это первая особенность ядерных сил.

Когда расстояние между нуклонами становится больше 10^{-13} сантиметра, ядерные силы очень быстро, практически сразу, обращаются в нуль. Иначе говоря, радиус действия этих сил приблизительно равен 10^{-13} сантиметров. А электрические и гравитационные силы, обратно пропорциональные квадрату расстояния, хотя и ослабевают с увеличением расстояния, но, формально говоря, обращаются в нуль только при бесконечно большом удалении от источника силы, то есть имеют бесконечно большой радиус действия. Конечность радиуса действия — вторая особенность ядерных сил.

Переходя к истории становления теории ядерных сил, имеющих две указанные выше особенности, начнем с рассмотрения того, как объясняли в классической физике механизм электростатического взаимодействия тел. До введения в физику понятия фотона рассуждали следующим образом. Один из протонов, например протон *A*, совершая в некотором ритме едва заметные колебания, излучает электромагнитную волну, которая, распространяясь во все стороны от *A*, достигает другого протона — *B*. Под ее воздействием протон *B* начинает колебаться и, в свою очередь, излучает в пространство электромагнитную волну. Волна от протона *B*, достигая протона *A*, изменяет характер его движения. И так далее, до

бесконечности. В результате подобного бесконечно повторяющегося обмена между частицами *A* и *B* возникает сила электростатического отталкивания.

Учет существования фотонов видоизменяет описанную картину взаимодействия: вместо обмена электромагнитными волнами частицы теперь обмениваются фотонами. Наглядно можно представлять себе, что они как бы перебрасываются специально приготовленными мячами (фотонами), в результате такого обмена между партнерами *A* и *B* возникает электростатическое взаимодействие. Понятно, что чем чаще обмен мячами, тем интенсивнее взаимное влияние *A* на *B*. Иначе говоря, тем больше действующая между ними электростатическая сила.

Изложенные соображения с обменом фотонами основаны на квантовой теории поля Гейзенберга—Паули, из которой следует, что если бы мяч (фотон) имел массу, то радиус действия электростатических сил был бы не бесконечен, а имел бы конечное значение, обратно пропорциональное массе «тяжелого фотона». Радиус действия электростатических сил бесконечно велик только потому, что масса фотонов равна в действительности нулю; лишь при этом условии радиус действия сил равен бесконечности.

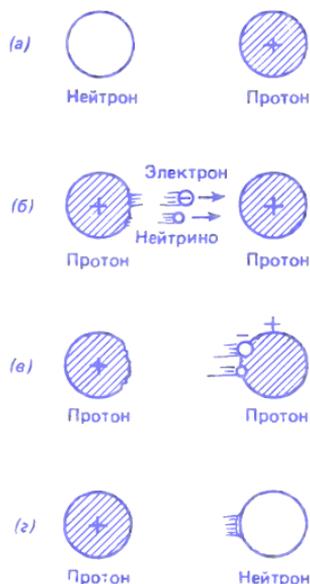
Впервые на это обстоятельство обратил внимание итальянский физик Ферми; им же предложен первый вариант теории ядерных сил с конечным радиусом действия. Единственной среди известных тогда элементарных частиц с ненулевой массой, которой можно было бы отвести роль мяча, перебрасываемого нуклонами, был электрон, поэтому Ферми и попытался объяснить ядерные силы как процесс переброса электронов между нуклонами.

Ферми занимался изучением механизма так называемой бета-радиоактивности; в ходе этой работы он и придумал свою теорию ядерных сил.

Сделаем небольшое отступление и скажем пару

слов о бета-излучении. Бета-лучи — это испускаемые нестабильными ядрами высокоэнергичные электроны. Изучение энергетических соотношений при испускании ядрами быстрых электронов привело швейцарского физика Паули к гипотезе о существовании новой, неизвестной до того времени элементарной частицы, которая, как и фотон, лишена массы, электронейтральна и, кроме того, очень слабо взаимодействует с веществом (практически неуловима). В настоящее время предсказанную Паули частицу называют нейтрино. Благодаря исключительной слабости взаимодействия нейтрино долго не могли обнаружить; она существовала как теоретическая частица-призрак.

Рис. 21. Фермиевский механизм взаимодействия нуклонов (теория бета-сил)



Вернемся к теме. Ферми в своей теории бета-распада и ядерных сил использовал электрон и введенную Паули призрачную частицу — нейтрино. Проследим за мыслью Ферми. Хотя это немного незаконно, допустим на минуту, что электрон, нейтрино и протон, сгрудившись вместе, образовали электронейтральную частицу — нейтрон. На рис. 21 при помощи наглядных образов пояснено, как представлял себе Ферми механизм действия ядерных сил. Электрон и нейтрино, заключенные в показанном на рис. 21, *а* нейтроне, внезапно покидают последний. Сразу после их вылета нейтрон превращается в протон, остающийся на месте; на рис. 21, *б* показано, как беглецы несутся между двумя протонами. Находившийся справа протон после захвата беглецов тут же превращается в нейтрон. Эти события пояснены на рис. 21, *б-г*. Результат описанного обмена можно интерпретировать как перестановку показанных на рис. 21, *а* протона и нейтрона. Далее, начиная с позиций рис. 21, *г*, происходит аналогичный процесс и восстанавливается позиция рис. 21, *а*. Подобное перебрасывание пары мячей (электрона и нейтрино) приводит к взаимодействию протона и нейтрона (ядерным силам). Если же вылетевшие из нейтрона электрон и нейтрино (показанные на рис. 21, *б*) не захватываются нарисованным справа протоном, а улетают в пространство, то они проявляются как испускаемые радиоактивным ядром бета-лучи. К этому и сводится теория, которая, по мысли Ферми, одновременно объясняет как бета-излучение, так и механизм действия ядерных сил.

Но, к сожалению, в теории Ферми был существенный недостаток: вычисляемый при ее помощи радиус действия ядерных сил оказывался в 200—300 раз больше действительного. Если бы электрон, играющий в теории Ферми роль мяча, был в 200 — 300 раз тяжелее, то радиус действия сил, обратно

пропорциональный массе мяча, уменьшившись в соответствующее число раз, стал бы именно таким, как нужно [35].

Теория Юкавы

Юкава допустил, что существует еще пока не открытый «тяжелый фотон», масса которого в 200—300 раз больше массы электрона. Такую частицу можно назвать также «тяжелым квантом» или «тяжелым электроном». По теории Юкавы, ядерные силы возникают в результате обмена этими гипотетическими частицами между нуклонами. Массу своей частицы Юкава, конечно, вычислил, исходя из известного радиуса действия ядерных сил. Поскольку для массы получилось промежуточное значение, больше значения массы электрона и меньше значения массы нуклона, Юкава назвал свою частицу «мезон» (греческое слово «месон» означает «находящийся посередине, промежуточный»).

Выше мы излагали теорию ядерных сил с чисто корпускулярной точки зрения. Но мезон Юкавы — элементарная частица; значит, он должен иметь двойственную корпускулярно-волновую природу и возможна волновая интерпретация теории ядерных сил.

Произнося слово «фотон», мы тем самым обращаем внимание на корпускулярную сторону микрообъекта, оставляя без внимания тот факт, что он представляет собой еще и электромагнитную волну (волнообразное движение электромагнитного поля). Об этом мы говорили уже несколько раз. Точно так же частица мезон — корпускулярное «лицо» двойственной сущности, волновая природа которой проявляется в колебаниях поля нового вида — мезонного. Рассмотрим теорию Юкавы с этой точки зрения.

Каждый нуклон создает вокруг себя мезонное

поле. Это поле заполняет всю «внутренность» атомного ядра. Если читатель видел когда-нибудь, как в деревянной бадье с водой моют молодую картошку, он может представить себе атомное ядро в виде такой бадьи, забитой картофелинами (нуклонами), купающимися в воде (мезонном поле). «Вода» не просачивается из «бадьи» наружу больше чем на радиус действия ядерных сил. Поверхность «воды» постоянно покрыта «рябью», так как источники мезонного поля («картофелины») испускают и поглощают волны этого поля. Волны распространяются от нуклона к нуклону. Посредством мезонных волн нуклоны в ядре прочно скреплены друг с другом. Так выглядит ситуация в атомном ядре с волновой точки зрения.

Юкава ввел в физику новое поле, коренным образом отличающееся от известных ранее гравитационного и электромагнитного полей. Предсказание Юкавы в действительности оказалось немного неточным: в его теории как бы перепутались частицы двух совершенно различных типов (впервые это обстоятельство осознал японский теоретик Танигава, ныне почетный профессор университета в Кобе) [36]. Одна из этих частиц в 300 раз массивнее электрона и является переносчиком взаимодействия между нуклонами (теперь ее называют пи-мезон, или пион), а вторая — в 200 раз тяжелее электрона и не имеет к ядерным силам никакого отношения. Последняя частица — как бы увеличенная копия электрона, поэтому разумно было бы назвать ее «тяжелый электрон», но привилось название «мюон». Несмотря на указанную неточность, в настоящее время общепризнано, что работа Юкавы ознаменовала рождение новой области науки — физики элементарных частиц. В этом великое значение теории Юкавы. Нечего и говорить, что за свою работу Юкава совершенно заслуженно получил Нобелевскую премию.

Классификация элементарных частиц

Мюон, о котором говорилось в конце предыдущего параграфа, открыли в экспериментах с космическими лучами в 1936 г. В течение некоторого времени его ошибочно принимали за частицу, предсказываемую теорией Юкавы, и называли частицей Юкавы. Но затем в 1947 г., тоже в опытах с космическими лучами, обнаружили пион; было признано существование мезонов двух видов.

В глубинах Галактики, к которой относится и наша Солнечная система, время от времени вспыхивают сверхновые звезды, при чудовищных взрывах которых во все стороны извергаются потоки частиц вещества. Космическими лучами называют дождь таких частиц, непрерывно сыплющийся на Землю. Космические частицы (в основном протоны и электроны) движутся с чрезвычайно высокими скоростями, почти равными скорости света. Достигая поверхности Земли, дождь этих частиц (о нем говорят как о космическом излучении) пронизывает, в частности, и тело каждого из нас. Когда мчащиеся с околосветовыми скоростями частицы космического излучения сталкиваются с ядрами кислорода, азота и других атомов атмосферы Земли, рождаются, в частности, мезоны, о которых мы говорили выше. Таким образом, облучаемая космическими лучами атмосфера Земли — это как бы установка по производству элементарных частиц. Естественно думать, что, кроме мезонов, в опытах с космическими лучами можно обнаружить и другие, не встречавшиеся еще, совершенно новые элементарные частицы. Поэтому во всех странах развернулись интенсивные исследования космических лучей.

В послевоенные годы новые частицы в космических лучах первыми нашли советские исследователи.

Но, честно говоря, в то время в мире не было доверия к каким бы то ни было сообщениям из СССР, поэтому публикациям советских физиков никто не поверил [37]. Но когда потом точно такие же сообщения поступили от американских ученых, существование новых частиц стало для всех несомненным фактом и физика элементарных частиц вступила в полосу бурного развития.

Число открытых к настоящему времени элементарных частиц зависит, конечно, от способа их подсчета, но в любом случае их более 300. Все частицы подразделяют на три больших класса. Частицы первого класса называют барионами. К барионам относят нуклоны и другие частицы, похожие на нуклоны по своим свойствам. Как показывает само название, все отличные от нуклонов барионы тяжелее нуклонов.

Ко второму классу принадлежат так называемые мезоны, к которым причисляют частицы, по свойствам близкие к пиону. Подобно частице Юкавы — пиону, носителю сил, действующих между нуклонами, все частицы, относимые ко второму классу (мезоны), являются носителями взаимодействия между частицами, принадлежащими первому классу (барионами). В этом смысле мезоны и барионы тесно связаны друг с другом. Силы, действующие между барионами, вообще называют сильными. Взаимосвязь барионов и мезонов, являющаяся первопричиной «сильных» сил, то есть эффект испускания и поглощения барионами мезонов, называют сильным взаимодействием мезонов и барионов.

Третий класс частиц содержит лептоны: электрон, упоминавшуюся выше «призрачную» частицу — нейтрино, а также мюон и другие похожие на электрон и нейтрино частицы. Свое название «лептоны» (в переводе с греческого — «легкие») частицы этого класса получили потому, что первоначально в него

входили только электрон и нейтрино — самые легкие из элементарных частиц. Но впоследствии к лептонам причислили частицы, не уступающие по массе мезонам и даже барионам, поэтому название «лептоны» вряд ли следует признать удачным.

Среди лептонов, так же как и среди частиц других классов, встречаются электрически заряженные частицы, взаимодействующие между собой при помощи электромагнитных сил. Кроме электромагнитного, между лептонами существует еще одно, очень слабое, взаимодействие, которое имеется также между лептонами и мезонами, и между лептонами и барионами. Нейтральный лептон — нейтрино — не имеет электрического заряда. Поэтому нейтрино взаимодействует с остальными частицами исключительно посредством слабых сил. По этой причине его очень долго не могли обнаружить экспериментально.

Оглянемся на пройденный путь. Пытаясь объяснить многообразие окружающего нас вещества, ученые пришли вначале к атомной гипотезе, согласно которой вещество построено из комбинаций сравнительно немногочисленных составных частей — атомов. Оказалось, впрочем, что атомов не так уж и мало — около сотни. Физики двинулись дальше в глубь вещества и добились успеха, объяснив многообразие атомов различиями в их внутренней структуре. В ходе этих исследований ученые постепенно проникли в мир еще более мелких частиц: от атомных ядер спустились до объектов, получивших название «элементарные частицы».

Когда впервые произнесли слова «элементарные частицы», конечно же, имели в виду окончательную картину строения вещества. Пока элементарных частиц было мало, надежда на скорое выяснение окончательной истины казалась обоснованной. Сначала знали только электроны, нуклоны, «призрачную» частицу — нейтрино; потом к ним добавились

частицы Юкавы. На ранней стадии было всего пять-шесть видов частиц: не так уж много. Если бы этим дело ограничилось и новых частиц открыто не было, то название «элементарные частицы» было бы оправдано: такие частицы действительно можно было бы считать окончательным материалом, из которого построено вещество. Однако реальность оказалась сложнее: выяснилось, что частиц слишком много, более 300. Поэтому, естественно, возродилась мысль: не существует ли еще более мелких, субмикроскопических объектов, из которых построены нынешние частицы, так называемые элементарные?

Изучению структуры атомов в свое время сильно помогло открытие периодического закона (который в виде таблицы Менделеева висит на стенах химических кабинетов любых школ); открытие этого закона явилось итогом изучения и классификации химиками многообразных свойств химических элементов.

Поэтому и в физике элементарных частиц началась работа по сопоставлению частиц, сначала чисто феноменологическому, группировке частиц по свойствам — словом, начались исследования по классификации элементарных частиц. Упомянутое выше разбиение частиц на три класса — один из результатов такой работы.

Теория кварков

Классификация элементарных частиц начала интенсивно развиваться с середины 1950-х годов. Параллельно предпринимались попытки построить все известные элементарные частицы из небольшого числа составных частей. Подобный подход неоднократно оправдывал себя в прошлом: достаточно напомнить успешное объяснение многообразных свойств около сотни атомов сочетаниями «кирпичи-

ков» всего трех сортов: протонов, нейтронов и электронов.

К числу таких попыток можно отнести нелокальную теорию поля Юкавы, единую теорию Гейзенберга и другие. Даже если учитывать довоенные предложения, число подобных глобальных теорий было невелико, их легко перечислить по пальцам. Этим приятным фантазиям не суждено было стать настоящими физическими теориями. Главная причина их неудачи в том, что они недостаточно учитывали информацию о феноменологических свойствах элементарных частиц.

Первый реальный успех в деле классификации элементарных частиц выпал на долю Гелл-Манна и Цвейга, показавших, что все известные к 1964 г. барионы и мезоны можно составить из трех фундаментальных объектов, названных Гелл-Манном кварками.

После 1964 г. были открыты новые барионы и мезоны, для классификации которых оказалось недостаточно трех кварков, введенных Гелл-Манном и Цвейгом. В настоящее время к трем первоначальным кваркам добавлены еще три: общее число кварков возросло до шести. Кроме того, принято, что каждый кварк существует в трех лицах; если каждое из этих лиц считать за особую частицу, то полное число кварков равно 18. Барионы образуются как соответствующим образом подобранные комбинации трех кварков; разным тройкам кварков отвечают разные барионы. Мезоны строятся из двоек (пар) кварков [38]. Разумеется, сказанное относится и к нашему старому знакомцу — пиону.

В отличие от барионов и мезонов лептоны в настоящее время рассматриваются как элементарные частицы в буквальном смысле слова, не имеющие внутренней структуры. Интересно то, что число видов лептонов (шесть) совпадает с числом кварков,

если три лица одного и того же кварка рассматривать как одну частицу. Такое совпадение, по-видимому, указывает на какую-то глубокую взаимосвязь между лептонами и кварками.

Мы уже говорили, что основные понятия теории кварков выдвинули американские ученые. Янки вообще известны как большие шутники, и данный случай не представляет исключения. Чтобы различить шесть кварков (каждый из которых существует в трех лицах), американские физики наделили кварки свойством, которое они назвали «аромат». Разумеется, никакого различимого носом запаха кварки не испускают, но считается, что каждый из шести (тройных) кварков «пахнет» по-своему, имеет, так сказать, особый, собственный аромат. В частности, все три лица каждого кварка «пахнут» одинаково, то есть имеют общий для всей троицы единый аромат.

А чтобы различить три лица, в которые воплощается каждый из шести кварков, пользуются словом «цвет». Конечно, кварки не имеют никакого видимого цвета. Такое название — просто метка, позволяющая различать «трех близнецов». Приписывание кваркам цвета можно пояснить еще так. Представьте себе, что на экране цветного телевизора одинаковые фигуры окрашены в три основных цвета: красный, зеленый, синий. Если выбрать по произволу одну красную, одну зеленую и одну синюю фигуру и наложить их друг на друга, то получится бесцветный (белый) образ.

Итак, каждый из 18 кварков имеет собственный аромат и цвет. При помощи цвета мы различаем кварковые лица, «пахнущие» одинаково: существует шесть различных «запахов»-ароматов. Выше мы говорили, что барионы строятся как подходящие комбинации трех кварков. Под словом «подходящая» имеется в виду бесцветная комбинация. То же отно-

сится и к парам кварков, из которых строятся мезоны. Комбинации надо выбирать «бесцветными», потому что наблюдаемые реально элементарные частицы не имеют цвета.

Придумывая названия ароматов, американцы тоже позабавились: они дали такие названия, чтобы не было неприятно нюхать, если бы кварки и в самом деле пахли. Названия даны веселые, смешные, похожие на названия духов в парфюмерной лавке: «очарование», «странность», «седьмое небо», «пучина». Невычурны названия только первых двух ароматов: «вверх» и «вниз» [39]. Три кварка, введенные Гелл-Манном и Цвейгом, имели ароматы «вверх», «вниз» и «странность».

На этом мы закончим ознакомление с фундаментальными частицами, из которых построено вещество. Следующая проблема: каковы силы, с которыми действуют друг на друга эти фундаментальные частицы; иначе говоря, каковы поля, передающие взаимодействия между фундаментальными частицами? Обсуждению этой проблемы посвящена оставшаяся часть книги.

ГЛАВА 7

ЧЕТЫРЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Какие бывают силы?

Наша Земля — одна из планет Солнечной системы, центральное светило которой, Солнце, в числе сотен миллиардов других звезд принадлежит Млечному Пути — нашей Галактике. Звезды, образующие Галактику, не рассеиваются в мировом пространстве, а сохраняют упорядоченную галактическую структуру благодаря силе всемирного тяготения, проще говоря, силе тяжести, создаваемой каждой из звезд. Почему сила тяжести способна собрать звезды в гигантские объединения — галактики, скопления галактик и т. п.? Во-первых, потому что эта сила сравнительно медленно (обратно пропорционально квадрату расстояния) ослабевает при увеличении расстояния от источника силы, а во-вторых, потому что сами источники тяготения — звезды — невообразимо велики, соответственно велико их притяжение.

Электрические силы тоже обратно пропорциональны квадрату расстояния, но звезды электронейтральны. Поэтому в астрономических масштабах электромагнитное взаимодействие звезд пренебрежимо мало по сравнению с гравитационным: распределение и движение звезд в звездных скоплениях и туманностях Большого космоса определяет только тяготение. Короткодействующие ядерные силы, как бы велики они ни были, совершенно не участвуют в явлениях астрономического масштаба [40].

Рассмотрим теперь явления земного масштаба, то есть силы, действующие в нашем непосредствен-

ном окружении. Для жителей Земли, конечно, большое значение имеет притяжение нашей планеты. Кроме него, мы часто встречаемся с силами, передающимися от тела к телу через соприкосновение. Пример — сила удара ракетки по теннисному мячу или, наоборот, удара мяча по ракетке.

Но если внимательно проанализировать, как возникают силы при соприкосновении тел (например, мысленно увеличить тело до таких размеров, чтобы стали видны детали его внутренней структуры), то можно убедиться, что мнение о передаче силы в момент соприкосновения тел, например ракетки и мяча, основано на недопонимании.

И ракетка и мяч состоят из атомов. Даже в момент удара ракетки по мячу между атомами, образующими поверхности ракетки и мяча, остается невидимый глазом очень маленький промежуток. Иначе говоря, два тела никоим образом не касаются друг друга в буквальном смысле слова. Сила удара, о которой мы думали как о силе, возникающей при соприкосновении тел, на поверку оказывается силой дальнего действия. Сказанное относится не только к случаю ракетки и мяча. Когда борец давит на шею партнера, проводя прием дзюдо, между его рукой и шеей противника обязательно остается зазор. Таким образом, встречающиеся нам в повседневной практике силы, обычно рассматриваемые как силы контактного происхождения, в действительности являются силами дальнего действия. Нам кажется, что возникает контакт, но это впечатление — ошибка, источник которой — приближенность нашего восприятия.

Если полного контакта нет и соответствующие силы — дальнего действия, то какова их природа? Это — силы электромагнитного происхождения [41]. Выше при рассмотрении строения атома мы говорили, что в центре атома находится положительно

заряженное ядро, вокруг которого обращаются отрицательно заряженные электроны. В целом атом электронейтрален. Поэтому два атома, разведенные на большое расстояние, электрически не взаимодействуют.

Взаимодействие возникает при сближении атомов. Ядра атомов заряжены положительно и потому отталкиваются. Аналогично отталкивают друг друга электроны, но электроны одного атома притягиваются к ядру другого, и наоборот. Силы отталкивания и притяжения по-разному зависят от расстояния между атомами, поэтому полной компенсации сил не происходит. Расчет показывает, что при сближении атомов отталкивание возрастает быстрее притяжения. Поэтому подведенные друг к другу атомы взаимно отталкиваются:

При разведении атомов сила отталкивания исчезает. Сложение сил отталкивания, действующих между многими атомами, образующими поверхности тел, приводит к тому, что ракетка отбрасывает мяч. То же относится и к другим случаям так называемого действия через соприкосновение.

Если же, не обращая внимания на взаимное отталкивание тел, сжимать их со все возрастающей силой, то притяжение может возобладать над отталкиванием; тогда поверхностные атомы сжимаемых тел могут слиться в молекулы. Притяжение — тоже разновидность сил дальнего действия, в конечном счете оно сводится к электростатическим силам. Нечего и говорить, что в данном случае большую роль играет расположение электронов, принадлежащих обоим атомам: сила взаимодействия атомов определяется электронными конфигурациями. Особенности конфигурационного взаимодействия объясняется, в частности, то, что не все атомы вступают в химическое соединение друг с другом.

Задачи о связи и столкновениях атомов и молекул в общем случае очень сложны. Принципиально говоря, для каждого конкретного вещества нужно рассмотреть задачу о поведении большого числа атомных ядер и электронов; решить такую задачу строго количественно и объяснить детали механизма взаимодействия невообразимо трудно. Но, говоря обобщенно, конкретные вещества, получаемые объединением множества атомов, связываются воедино за счет сил электромагнитного происхождения.

Переведем теперь взгляд внутрь атома. Силы, удерживающие электроны в окрестности атомного ядра, — электромагнитного происхождения. Но в формировании находящегося в центре атома атомного ядра основную роль играют ядерные (сильные) силы.

Кроме сильных, в ядре действуют еще слабые силы, через которые нейтрино, электроны (бета-лучи) и другие лептоны взаимодействуют с нуклонами (слабое взаимодействие).

Подытоживая, можно сказать, что нашу Вселенную в конечном счете формируют силы всего четырех типов: гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые. От радиуса действия сил зависит масштаб явлений, в которых те или иные силы играют основную роль.

Сила тяжести проявляется главным образом в явлениях астрономического масштаба, электромагнитные силы — в так называемом макромире (мир обычной человеческой деятельности, масштаб от размеров Земли до размеров атомов и молекул), а сильные и слабые силы, радиус действия которых очень мал, существенны в явлениях ядерного масштаба, в мире элементарных частиц.

Барions и мезоны в настоящее время считают не элементарными, а составными частицами, построенными из кварков. Поначалу модель кварков вос-

принимали просто как одну из возможных гипотез, потому что никак не удавалось выделить кварки в свободном состоянии, например расщепить протон на три кварка. Но в конце 60-х гг. в США были поставлены опыты по «просвечиванию» протонов очень быстрыми электронами. Эти опыты показали, что внутри нуклонов, в согласии с теорией кварков, имеются точечные объекты (частицы). Поэтому теперь почти никто не сомневается в реальности кварков. Какие же силы соединяют кварки в нуклоны?

Силы, «склеивающие» кварки в барионы и мезоны, так и называют: силы склеивания, глюонные силы [42]. Подобно тому как электромагнитные силы передаются электромагнитным полем, глюонные силы передаются глюонным полем, кванты которого — глюоны. С учетом этих новых глюонных сил число фундаментальных сил во Вселенной становится равным пяти [43].

Классификация сил

Сначала я хочу изложить мою личную позицию в вопросе о классификации взаимодействий. Чтобы представить свою точку зрения в развитии, мне удобно начать с ситуации, существовавшей до появления модели кварков, когда господствовала мезонная теория ядерных сил; это время с конца 40-х до начала 50-х гг.

Когда говорят, что теория Юкавы дала решение проблемы ядерных сил, не надо упускать из виду, что, прежде чем обрести свою законченную форму, эта теория прошла с момента публикации первой статьи Юкавы примерно десятилетний извилистый путь развития. Для новой физической теории естественны подобные перипетии, зигзагообразный ход развития, чередование успехов и неудач. Иначе и быть не может. Сейчас речь не об этом. Я хочу

сказать другое: в то время я был не удовлетворен окончательной, общепризнанной формой, которую в конце своего развития приняла мезонная теория Юкавы.

Форма математических соотношений, выражающих поведение гравитационного поля и связь этого поля с веществом (на которое поле действует), однозначно, без какого бы то ни было произвола определяется тремя принципами: общим принципом относительности, принципом эквивалентности и принципом (законом) сохранения энергии.

Точно так же форма математических уравнений, выражающих поведение электромагнитного поля и его связь с движением заряженных частиц, практически полностью определяется законом сохранения электрического заряда и принципом (частным) относительности.

Но не существует никакого руководящего принципа для выбора математических характеристик пионного поля (мы будем называть его также полем Юкавы) и формы связи этого поля с его источниками — нуклонами. С чисто теоретической точки зрения ничто не мешает нам выбрать уравнения этого поля в той или иной математически возможной форме. Единственным ограничением на выбор вариантов является согласованность следствий, вытекающих из конкретной формы теории Юкавы, с данными эксперимента. Физики вынуждены полагаться только на метод проб и ошибок, то есть идти по пути постепенного сужения круга конкурирующих друг с другом теоретических выражений.

Поскольку физика элементарных частиц принадлежит к числу наук о природе, естественно требовать, чтобы предсказания теории оправдывались на опыте, в этом смысле процедура проб и ошибок не вызывает нареканий. Опыт — окончательный судья и для общей теории относительности, и для

максвелловой теории электромагнитного поля, и, конечно, для теории Юкавы.

Но для теории относительности и максвелловой теории электромагнетизма найдена логически неизбежная форма: попытка пересмотра этих уже завершённых теорий возвращает исследователя к уже известной формулировке, так как обнаруживается, что существуют руководящие принципы, приводящие именно к такой и никакой иной форме теории. А для теорий типа Юкавы подобных руководящих принципов пока не было открыто, чем и объясняется то чувство неудовлетворенности мезонной теорией, о котором я написал выше. В глубине души я был уверен, что в то время (вторая половина 40-х гг.) теория Юкавы еще не достигла окончательного завершения, что она еще ждет своего вывода из какой-то другой, более фундаментальной теории.

Мое впечатление укреплялось, и я все больше верил в его истинность, по мере того как в космических лучах одну за другой открывали новые элементарные частицы и увеличивалось число мезонов. Ведь при выборе математических выражений для мезонных полей и определении формы связи новых мезонов с вновь открываемыми и известными ранее барионами, так же как и в случае частицы Юкавы, кроме метода проб и ошибок, не было другого руководящего принципа.

Поэтому я разделил для себя мысленно все взаимодействия на два больших класса. Взаимодействия гравитационного и электромагнитного полей с веществом, выводимые из фундаментальных принципов, я назвал «взаимодействиями первого класса». А взаимодействия, не входящие в эту группу (например, взаимодействия мезонных полей с барионами), отнес к «взаимодействиям второго класса».

В то время, за десять лет до создания теории кварков, конечно, не возникало и речи о силах,

скрепляющих кварки между собой. Кроме сильных, были известны еще слабые взаимодействия. Раздавались голоса, что должны существовать поля, передающие слабые силы, но свойства этих полей и способы связи лептонов с барионами, как и в случае с мезонными полями, искали только на ощупь. Поэтому слабые взаимодействия я тоже причислил к взаимодействиям второго класса.

Существуют ли другие взаимодействия первого класса, отличающиеся от гравитационного и электромагнитного? Если да, то каковы математические свойства соответствующих полей и какова форма их связи с элементарными частицами? Такие вопросы возникали у меня снова и снова. Чтобы как-то подступиться к проблеме, я попытался сначала определить, в чем состоит общность гравитационного и электромагнитного полей. Кроме того, я продолжал втайне заниматься единой теорией поля (читатель помнит, наверно, что идея Вейля интересовала меня с давних пор). Я работал внимательно и ждал, не улыбнется ли удача. Стремясь к созданию общей теории полей первого класса, я еще и еще раз штудировал старые единые теории, постоянно опасаясь насмешек окружающих; и наконец-то мои усилия были вознаграждены.

Поля, переносящие взаимодействия первого класса, о которых я здесь говорю, в настоящее время называют в физике калибровочными или некоммутативными калибровочными полями. Рассказ о том, как мне удалось построить общую теорию этих полей и найти ответы на поставленные выше трудные вопросы, лучше всего начать с изложения калибровочной теории Вейля. Хотя теория Вейля как вариант единой теории поля и не достигла успеха, но с точки зрения моих целей она была прекрасным образцом, неиссякаемым источником вдохновения, содержащим

множество ценных замечаний и наводящих соображений.

Поэтому я отвожу обсуждению теории Вейля специальную главу, здесь же сделаю только следующее замечание. В предыдущем параграфе, говоря о силах, формирующих облик нашей Вселенной, я сказал в заключение, что таких сил пять. Но теория кварков выводит сильные взаимодействия элементарных частиц из свойств глюонных сил, действующих между кварками. Иначе говоря, сильные взаимодействия, осуществляемые переброской мячей-мезонов между барионами, можно полностью объяснить, разобравшись в свойствах глюонного поля и в поведении кварков — объектов действия этого поля. Таким образом, с современной точки зрения в природе есть четыре основных взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, слабое и глюонное.

Переход от мезонной теории ядерных сил к глюонной теории взаимодействий кварков будто бы подтверждает правильность того чувства неудовлетворенности сильными взаимодействиями, о котором я говорил раньше. Это приятное для меня обстоятельство, но как бы не получилось, что я радуюсь преждевременно. Ведь если выяснится, что глюонное поле (более фундаментальное, чем поле «сильных» сил) само относится к полям второго класса, то, с моей точки зрения, оно окажется столь же неудовлетворительным, как и поле «сильных» сил, которому оно пришло на смену. Вопрос тогда останется нерешенным. Поэтому ниже мы еще раз обсудим свойства глюонного поля.

ГЛАВА 8 КАЛИБРОВОЧНАЯ ТЕОРИЯ ВЕЙЛЯ

Потенциал

Обсудим сначала важное для теории Вейля понятие потенциала. Передача прогноза погоды по телевидению часто иллюстрируется картой Японии, на которой показано распределение атмосферного давления. В меру своих способностей я воспроизвел одно из таких распределений на рис. 22. Кривые линии (изобары), соединяющие на рисунке точки одинакового давления, напоминают линии постоянной высоты на географических картах.

Если на землю положить мячик, он покатится вниз тем быстрее, чем круче уклон местности. Скорость мячика не зависит от высоты места над уровнем моря, она определяется только крутизной склонов.

Если рис. 22 интерпретировать как карту местности, то изображенные на нем стрелки надо понимать как направления, в которых скатывается со склона мячик. Если же в соответствии с подписью к рисунку рассматривать его как карту атмосферного давления, то стрелки приобретают смысл направлений, в которых дуют ветры. Можно было бы, конечно, потрудиться и показать на карте не только направления, но и силу ветров (например, варьируя длину стрелок), но на столь кропотливую работу я оказался неспособен и ограничился показом направлений. Однако опытный человек в состоянии «прочитать» как направления, так и силу ветров по карте, на которой вообще нет стрелок, а изображены только изобары. Поэтому старательно вырисовывать в каждой точке стрелки вовсе не обязательно:

вся необходимая информация о ветрах заключена уже в изобарах, а рисовать карту с изобарами проще, чем со стрелками.

Чтобы выяснить распределение электрического поля, в каждую точку помещают маленькое пробное тело, которому сообщен электрический заряд, равный единице. Наблюдая его движение, определяют направление и величину действующей на тело силы (ее называют вектором напряженности или просто напряженностью поля); напряженность в разных точках изображают стрелками соответствующей длины. Одного взгляда на такое изображение достаточно, чтобы составить наглядное представление о распределении поля. Правда, электрическое поле обычно задано в трехмерном пространстве, и показать его на плоском рисунке бывает затруднительно.

Вместо показа величины и направления напряженности электрического поля стрелками распределение поля можно представить при помощи семейства поверхностей (на плоских географических картах роль таких поверхностей играют линии по-

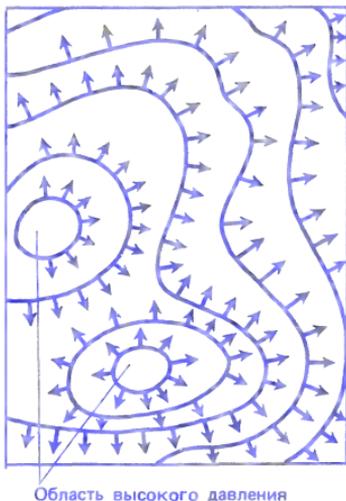


Рис. 22. Распределение атмосферного давления

стоянной высоты). Смысл этих поверхностей аналогичен смыслу изобар на погодной карте: по расположению изобар можно определить силу и направление ветров, а по взаимному расположению поверхностей — величину и направление напряженности электрического поля. Иначе говоря, если силе и направлению ветра сопоставить величину и направление напряженности электрического поля, то семейству изобар надо поставить в соответствие семейство указанных поверхностей.

На погодной карте изобары соединяют точки одинакового давления. Для аналогичного истолкования обсуждаемых поверхностей нужно вообразить себе распределение электрического давления, которое принимает постоянное значение во всех точках одной и той же поверхности.

Электрическое давление — вспомогательная величина, введенная для облегчения восприятия распределения электрического поля. Как ясно из сказанного, скорость пространственного изменения (градиент) электрического давления указывает величину и направление напряженности электрического поля. Это специфическое свойство «электрического давления». Вспомогательные величины, имеющие такое свойство, в физике вообще называют потенциалами. Так, атмосферное давление можно назвать потенциалом скорости ветра. «Электрическое давление» называют просто электрическим потенциалом или потенциалом электрического поля.

Заметим, что сама величина потенциала не влияет на распределение напряженности электрического поля. Важен только градиент потенциала. Увеличение потенциала во всех точках на одно и то же значение не изменяет напряженности электрического поля. Точно так же скорость скатывания мячика с горки не зависит от высоты горки над уровнем

моря. Потенциал как таковой измерить невозможно. Измерению доступен только градиент потенциала; иначе говоря, измеряют лишь разности значений потенциала в соседних точках. Наблюдаемой величиной является напряженность электрического поля (сила, действующая со стороны поля на помещенный в данную точку единичный пробный заряд).

Перейдем теперь к постоянному магнитному полю. Можно ли его рассматривать точно так же, как поле электростатическое? Нет. Причина в том, что эти два поля коренным образом различаются. Источниками электрического поля являются положительные и отрицательные электрические заряды, которые могут существовать независимо друг от друга; например, телу можно сообщить только положительный или только отрицательный заряд. Рис. 22 будет отражать взаимосвязь электрического заряда и напряженности электрического поля, если условиться, что показанные на нем стрелки символизируют векторы напряженности электрического поля, которые выходят из положительного и входят в отрицательный заряд. Если же воспользоваться аналогией с рельефом местности, то надо считать, что положительный электрический заряд находится в местах расположения вершин холмов, а отрицательный — вблизи дна долин. Напряженности электрического поля тогда соответствует крутизна и направление склонов, а высота рельефа в каждой точке — потенциалу электрического поля.

У магнитов имеются южный и северный полюса, аналогичные положительному и отрицательному электрическому зарядам, но в отличие от зарядов разделить полюса абсолютно невозможно. На рис. 23 показано, как ориентируются стрелки маленьких переносных магнитиков, расположенных вблизи большого магнитного стержня. Чтобы уз-

нать ориентацию стрелок внутри стержня, в нем надо проделать узкие длинные каналы.

Важно заметить, что снаружи магнита стрелки направлены от северного полюса к южному, а внутри — наоборот, от южного к северному. Это значит, что последовательность стрелок (ее называют магнитной силовой линией) нельзя уподобить потоку воды, текущему с возвышенности в долину; такая аналогия привела бы к тому, что при наблюдении снаружи магнита северный полюс оказался бы «выше» южного, а при наблюдении изнутри — южный «выше» северного.

Такая противоречивая ситуация характерна для магнитного поля. Ясно, что его распределение невозможно выразить при помощи одного потенциала, аналогичного атмосферному давлению. Анализ показывает, что для описания необычных свойств магнитного поля надо воспользоваться тремя потенциалами (трехкомпонентным, или векторным, потенциалом; однокомпонентный потенциал электростатического поля называют скалярным). Необходимость именно трех компонент тесно связана с тем, что наше пространство трехмерно.

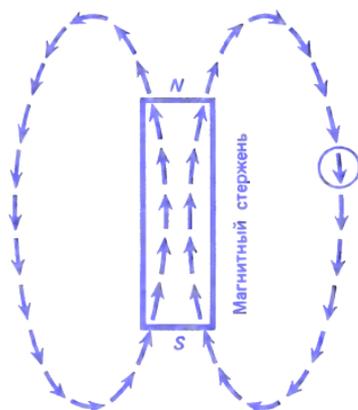


Рис. 23. Силовые линии постоянного магнита

В первой главе указывалось, что электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом. Эта взаимосвязь проявляется, например, в том, что изменяющееся во времени электрическое поле, вообще говоря, нельзя охарактеризовать одним (скалярным) потенциалом: надо привлекать введенный в связи с рассмотрением магнитного поля трехкомпонентный (векторный) потенциал. Таким образом, для совместного описания электрического и магнитного полей необходим потенциал, имеющий $1+3=4$ компоненты. Такую четырехкомпонентную величину называют электромагнитным потенциалом (потенциалом электромагнитного поля). Четыре компоненты нужны потому, что наше пространство-время с математической точки зрения является четырехмерным пространством.

Сравнение длин

Теперь мы достаточно подготовлены, чтобы перейти, наконец, к изложению идей Вейля. Как надо действовать, если мы хотим сравнить размеры предметов, находящихся, например, в Токио и Осаке? Ясно, что предварительно следует доставить, скажем, из Осаки в Токио метровую линейку, которой меряют предметы в Осаке, и, сравнив ее с соответствующей линейкой в Токио, убедиться, что обе линейки имеют одинаковую длину. После этого размеры предметов можно сравнивать, измеряя их линейками в Токио и Осаке и сообщая результаты измерений, например, по телефону.

На первый взгляд описанная процедура безупречна, но на самом деле это не так. Если по пути из Осаки в Токио длина линейки изменилась, то и при совпадении длин доставленной из Осаки и токийской линеек пользоваться ими для сравнения размеров предметов в Осаке и Токио нельзя. А ли-

нейки, даже стальные, изменяют свою длину, например при переносе из теплого места в холодное. Но можно представить себе линейки, изготовленные из идеального сплава, совершенно не подверженного влиянию температуры, влажности и т. п.; длины таких линеек при доставке из Осаки в Токио не должны изменяться, и ими-то уж, наверно, можно пользоваться?

Отвлечемся немного и подумаем: как мы можем заметить, что длина линейки изменилась? Ответ вроде бы понятен — по изменению относительных размеров линейки и окружающих предметов. Но как решить, что произошло: удлинилась (сократилась) линейка или размер линейки остался неизменным, а, наоборот, сократились (удлинились) все окружающие предметы? Трудно, конечно, но в этом случае мы хотя бы будем уверены, что произошло либо то, либо другое.

Если же линейка и все окружающие предметы изменили свои размеры в одном и том же отношении, то относительного изменения размеров не произошло и нам не удастся заметить изменения длины линейки. Однако физические воздействия — такие, как изменения температуры, влажности и т. д., — не могут привести к одновременной, совершенно одинаковой деформации сразу всех предметов: изменения под воздействием физических факторов зависят от формы и свойств вещества. Таким образом, изменение длины линейки под действием физических причин мы обязательно тем или иным способом обнаружим. Более того, мы в состоянии, по крайней мере в принципе, либо предотвратить, либо исправить результаты физических воздействий физическими же средствами; иначе говоря, изготовить с любой желаемой степенью точности упоминавшиеся выше линейки из идеального сплава, на который не влияют никакие физические агенты.

Итак, помехи за счет физических факторов можно обойти.

Но нельзя поручиться, что не происходит изменения длины идеальных линеек (изготовленных из идеального сплава) за счет какой-то нефизической причины. А если эта причина к тому же вызывает одновременную одинаковую деформацию всех тел, то такого изменения мы не в состоянии заметить.

Какой же нефизический фактор может изменять длину тел? Очень вероятно, что это — геометрия окружающего нас пространства-времени. В самом деле, теория относительности уже указала нам общий пример такого рода: сила тяжести проявляется как геометрическая характеристика пространства-времени (его кривизна). Кстати, одновременное одинаковое изменение характеристик всех тел происходит уже в этом случае. Действительно, вспомним мысленный опыт со свободным падением ящика под действием кривизны (в поле тяжести), когда перерезана поддерживавшая его над звездой веревка. Находящиеся в ящике наблюдатели не осознают нависшей над ними смертельной опасности только потому, что скорость всех предметов в ящике возрастает одновременно в одном и том же отношении.

Поскольку существует столь замечательный пример, не покажется удивительным, если среди геометрических свойств пространства обнаружится и такое, которое способно изменять длину предметов.

Пространство с нужной для этого геометрией придумал Вейль. Представим себе, что идеальная линейка переносится из одной произвольной точки пространства в другую. И пусть вследствие геометрических свойств пространства длина линейки во время переноса постепенно изменяется. Поскольку причина изменения кроется в свойствах простран-

ства как такового, при переносе в одном и том же отношении будет изменяться размер не только линейки, но и всех находящихся в пространстве предметов. Поэтому живущие там люди никаких изменений не заметят. Это специфическая особенность придуманного Вейлем пространства, которое так и называют: пространство Вейля. Пространство с подобными свойствами не рассматривали ни Риман, ни Эйнштейн.

Если изменения размера тел в пространстве Вейля заметить невозможно, то не окажется ли, что его пространство бесполезно для представления такой наблюдаемой физической величины, как электромагнитное поле? Столь пессимистическое заключение чересчур поспешно. В самом деле, вспомним еще раз, как проявляется кривизна пространства. Лица в падающем ящике не ощущают изменения скорости падения, если ограничиваются наблюдением предметов в ящике; но, выглянув наружу, они легко заметят изменение скорости. Так же и в пространстве Вейля: расширив поле зрения, можно зарегистрировать изменение длины. Рассмотрим это более подробно.

Пространство Вейля

Перейдем к изложению теории Вейля. Эталоном длины будем считать хранящийся в Париже метр. Примем, что мы живем в пространстве Вейля [44]. Пусть в каждую точку нашего пространства из Парижа доставлена идеальная метровая линейка, идентичная с парижским эталоном. Тем самым в каждой точке определен стандарт длины, или масштаб. Линейка, приготовленная из идеального сплава, не должна изменять свою длину, поэтому мы уверены, что находящийся в точке нашего местоположения масштаб идентичен париж-

скому метру. Но бог видит, что благодаря особенностям нашей геометрии линейки в разных точках имеют разную длину. Мерой отклонения длины идеальной линейки, расположенной в той или иной точке, от длины находящегося в Париже эталона служит отношение длины этой линейки, видимой богом, к длине парижского эталона. В каждую точку нашего мира указанное отношение внесено божественной волей.

Каким бы образом господь бог ни задавал масштабное отношение (калибровку) в каждой точке, мы не сможем этого заметить. И если он решит изменить калибровочное предписание, для нас это тоже остается неведомым. Изменение масштаба (калибровки) в каждой точке математики называют масштабным, или калибровочным, преобразованием. Утверждение, что при помощи физических средств нельзя заметить изменения масштаба, можно выразить по-другому: хотя по повелению свыше во всех точках введены новые масштабы, в физическом мире не произошло никаких изменений. Иначе говоря: *мир людей инвариантен относительно калибровочных преобразований (калибровочная инвариантность мира людей)*.

Поясним эту инвариантность примером. Пусть во всех точках нашего пространства находятся идеальные линейки. Мы со всеми своими физическими приборами не можем различить два случая: первый, когда господь бог изменил калибровку так, что масштабное отношение всюду в той или иной мере отличается от единицы; второй, когда масштабное отношение во всех точках постоянно и равно единице. По определению первый случай получается из второго применением калибровочного преобразования; таким образом, наша неспособность различить оба случая — просто частное проявление калибровочной инвариантности.

Можно вообразить ситуацию, когда определение масштаба в разных точках неосуществимо. Предположим, что мы вывезли из Парижа две одинаковые линейки и доставили их в Токио разными путями: одну через Сибирь, а другую — через Америку; в Токио обнаружилось, что линейки имеют разную длину. Нам будет трудно решить, какую из линеек принять за эталон длины для Токио: ведь по крайней мере одна из них должна отличаться по длине от парижского эталона. В таком случае даже мы (а не только бог) сможем заметить, что масштабы изменяют длину при передвижении с места на место.

Но реализуема ли такая странная возможность изменения длины линеек за счет переноса их в другое место? Оказывается, да. Чтобы пояснить возникновение подобного геометрического феномена, мы рассмотрим вместо изменения длины более наглядное и легче воспринимаемое явление: изменение направления стрелок при их параллельном переносе.

Параллельный перенос стрелок

Пусть на плоскости дан треугольник ABC . Перенесем показанную на рис. 24 стрелку a из точки A в точку B вдоль прямой AB . Во время переноса будем следить за тем, чтобы направление стрелки в любой промежуточной точке пути совпадало с ее начальным направлением (такое перемещение стрелки называют в геометрии параллельным переносом). Доставленная в точку B стрелка a занимает положение b . Далее, осуществим параллельный перенос стрелки b из точки B в точку C вдоль прямой BC . Стрелка тогда примет положение c . Для контроля параллельности переноса, то есть неизменности направления стрелки во время движе-

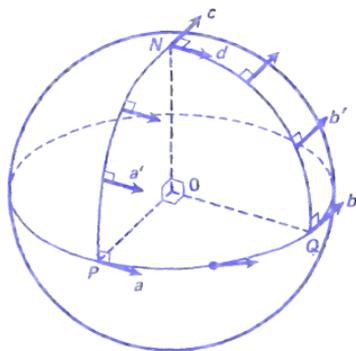
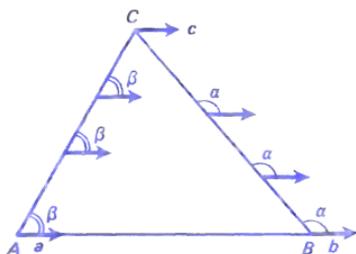
ния, надо следить за тем, чтобы угол между стрелкой и прямой BC все время оставался равным α , как показано на рис. 24.

А теперь произведем параллельный перенос стрелки a из точки A в точку C вдоль прямой AC . В точке C стрелка займет положение c , совпадающее с положением, которое она приняла в результате параллельного переноса вдоль пути ABC . Перенос вдоль прямой AC будет параллельным, если угол между стрелкой и прямой AC все время равен β .

Из сказанного ясно, что при параллельном переносе стрелки из одной точки плоскости в другую направление стрелки в конечной точке однозначно определяется ее направлением в начальной точке и не зависит от формы и длины пути, по которому производился параллельный перенос. Используя этот факт, для произвольной точки плоскости можно определить, какое направление в этой точке совпадает с направлением стрелки a . В самом деле,

Рис. 24. Параллельный перенос стрелок (I)

Рис. 25. Параллельный перенос стрелок (II)



поскольку направление стрелки в конечной точке не зависит от пути параллельного переноса, можно выбрать простейший из путей — прямую, соединяющую эту точку с точкой A , и перенести стрелку a из A в рассматриваемую точку. Для гарантии неизменности направления стрелки в ходе переноса достаточно следить за тем, чтобы угол между стрелкой и прямой, вдоль которой производится перенос, все время поддерживался постоянным.

Сложнее случает искривленной двухмерной поверхности, например сферы. Выше мы уже говорили, что кратчайшей линией, соединяющей две точки сферы, является проходящая через них дуга большого круга (напомним, что большим кругом называют сечение сферы плоскостью, проходящей через центр ограничиваемого сферой шара). Вспоминая, что кратчайшей линией, соединяющей две точки плоскости, является отрезок прямой, видим, что при переходе от плоскости к сфере надо сопоставить прямым линиям плоскости большие круги сферы. Таким образом, две «прямые» сферы (два больших круга) всегда пересекаются. Следовательно, в случае сферы высказывания «два направления параллельны» и «две прямые не пересекаются» означают не одно и то же. Каким же образом надо определить на сфере понятие параллельности? Рассмотрим этот вопрос подробнее.

На рис. 25 показана сфера. Точка O — центр заключенного в ней шара, N — северный полюс. P и Q — две точки на экваторе: радиусы OP и OQ по построению взаимно перпендикулярны. Отрезки меридианов PN , QN и экватора PQ — дуги больших кругов. Таким образом, треугольник PQN на сфере (см. рис. 25) соответствует треугольнику ABC на плоскости (см. рис. 24).

Пусть находящаяся в точке P стрелка a направлена точно на восток. Сначала мы произведем па-

параллельный перенос этой стрелки вдоль меридиана PN . Мы считаем, что утверждение «направление стрелки не изменяется» (иначе говоря: «показанные на рис. 25 стрелки a и a' параллельны») означает, что углы между стрелками a , a' и меридианом RN одинаковы (в данном примере углы прямые). Таково принятое в этой книге определение параллельности двух направлений.

Тогда в результате параллельного переноса вдоль дуги большого круга PN из точки P в точку N стрелка a займет положение d .

Сделаем теперь параллельный перенос стрелки a вдоль экватора в точку Q . В пути направление стрелки не будет изменяться, если она все время указывает точно на восток. После параллельного переноса в точку Q стрелка примет положение b . Далее выполним параллельный перенос стрелки b вдоль меридиана QN в северном направлении. При этом мы должны следить, чтобы стрелка по пути все время смотрела на восток. Тогда в точке N она займет положение c . К своему изумлению мы обнаруживаем, что хотя по пути стрелки все время смотрели в одном и том же направлении — на восток, направления стрелок, перенесенных в точку N по разным путям, различаются на 90° .

Причина этого понятна из рисунка. Человек, следящий за тем, чтобы при движении вдоль экватора стрелка все время была направлена на восток, уверен, что направление стрелки сохраняется. Но бог, наблюдающий за движением извне Земли, ясно видит, что при смещении вдоль экватора стрелка ежеминутно изменяет свое направление. Воспринять это изменение может только наблюдатель, который, подобно богу, смотрит на Землю издалека. Если же вообразить, что жители Земли являются идеально плоскими слизняками, не имеющими понятия о третьем измерении (небесах), то станет ясно, что такие жи-

тели не в состоянии заметить изменения направления стрелки.

Полученный результат можно сформулировать еще и так: хотя d параллельно a и a параллельно b , но d не параллельно b . И не понятно, какое направление в точке N (d или c) параллельно направлению a .

Причина столь удивительного положения состоит в том, что это свойство двухмерного криволинейного пространства, называемого сферой. Когда кривизны нет (случай плоскости), не возникает и такого странного отличия направлений. Иначе говоря, угол, на который различаются направления в точке N , можно рассматривать как меру кривизны двухмерного пространства. То же относится и к остальным (недвухмерным) криволинейным пространствам.

Из сказанного понятно, что для удаленных друг от друга точек P и N вопрос о том, параллельны ли находящиеся в них стрелки, не имеет смысла. Но для двух бесконечно близких точек ответ на этот вопрос существует: надо сначала соединить точки дугой большого круга, а затем воспользоваться определением, заключенным в кавычки на стр. 166.

Калибровочное поле

Итак, в криволинейном пространстве, подобном сфере, невозможно решить, параллельны ли направления стрелок, расположенных в удаленных друг от друга точках пространства. Вопрос о параллельности имеет смысл только для стрелок, находящихся в бесконечно близких точках.

Оставим стрелки и подумаем о длине линеек. Надо надеяться, что история со стрелками достаточно подготовила читателя к тому, чтобы он согласился с возможностью появления разницы в дли-

не линеек, перенесенных из одной точки в другую по разным путям.

Причиной рассогласования направлений стрелок, параллельно перенесенных из одной точки в другую по разным путям, является искажение пространства (его кривизна). Этот пример навел Вейля на мысль, что появление разности длин у линеек при переносе их из точки в точку по разным путям может указывать на существование неизвестного ранее, совершенно нового типа искажения пространства в окрестности путей переноса. Именно этот новый тип искажения пространства и является причиной возникновения различия длин линеек.

Назовем введенный Вейлем тип искажения пространства вейлевой деформацией или деформацией масштаба. В нашей аналогии между линейками и стрелками деформация соответствует кривизне пространства (причине изменения направлений стрелок при их параллельном переносе по разным путям). Не нужно думать, что вейлева деформация — слишком абстрактное понятие, доступное восприятию только бога: мы, люди, тоже способны судить о ее существовании по появлению разности длин линеек, когда их переносят по разным путям.

Понятно, что при наличии деформации масштаба в пространстве Вейля теряет смысл вопрос о том, равны ли длины линеек, расположенных в удаленных друг от друга точках. Но такой вопрос сохраняет смысл относительно длин линеек, находящихся в близких точках P , Q . Длины этих линеек можно сопоставить, перенося линейку из точки P в точку Q и сравнивая ее с линейкой, находившейся в Q сначала (если расстояние, на которое сдвигается линейка, достаточно мало, то изменением ее длины при изменении пути переноса можно пренебречь).

Поэтому разумно следующим образом описать ситуацию в деформированном пространстве Вейля.

Надо отказаться от мысли об определении масштаба в каждой из точек мира Вейля при помощи линейек, распределенных по точкам вейлева пространства. В самом деле, при наличии вейлевой деформации у нас нет разумного способа определения масштаба в точке, ибо длина помещенной в точку линейки зависит от пути, по которому линейка доставлена в эту точку. По точкам мира Вейля надо распределять не длины линеек, а значения относительных приращений их длин [45], то есть бог должен сообщить в каждую точку величину изменения длины находящейся в этой точке линейки при ее смещении в близкую точку. Возможность распределения по точкам вейлева пространства значений таких приращений длины ясна из предыдущего обсуждения, а вопросом о зависимости длины линейки от пути ее доставки в данную точку нам лучше не интересоваться.

Итак, подобно тому как в окружающем Землю пространстве задается распределение атмосферного давления, в пространстве Вейля бог распределяет значение приращений длин линеек, которыми определяются геометрические свойства пространства. Ту же мысль можно выразить, сказав, что в пространстве задано поле приращений длин линеек, определяющее геометрию. Изложенное выше толкование принадлежит Вейлю. Введенное им поле приращений длин линеек называют также калибровочным полем Вейля, потому что оно описывает, как, по мнению бога, изменяются длины находящихся в точках пространства линеек при смещении линеек в близкие точки.

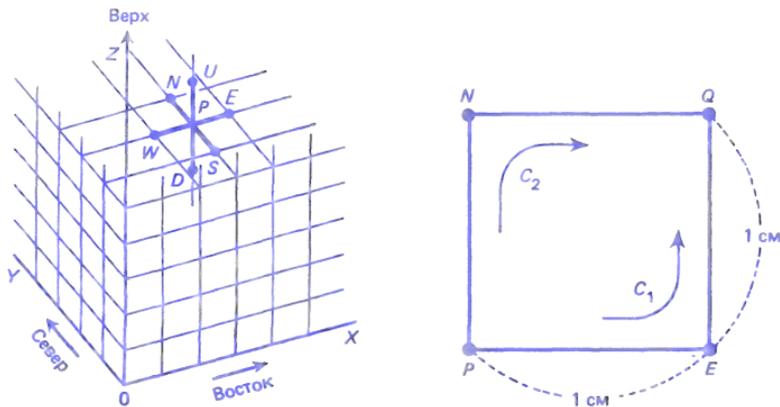
Рассмотрим вейлево калибровочное поле немного подробнее. Выше мы говорили об изменении длины идеальной линейки при ее переносе из точки P в соседнюю точку Q ; но величина этого приращения может зависеть от направления и величины смеще-

ния. Поэтому надо выразиться поточнее. Примем, что соседние точки расположены в одном сантиметре от точки P на трех взаимно перпендикулярных осях: запад—восток, север—юг и верх—низ. Калибровочное поле Вейля будет определено, если мы укажем, каковы в каждой точке значения приращения длины линейки при ее смещении из этой точки на один сантиметр в указанных направлениях. Сделанное определение выиграет в наглядности, если воспользоваться следующей иллюстрацией.

Представим себе, что пространство заполнено показанной на рис. 26 объемной кубической решеткой с постоянным шагом, равным одному сантиметру. Пусть при смещении идеальной линейки длиной один метр из точки P в точки E (на восток), N (на север) и U (вверх) длина линейки увеличивается соответственно на A_1 , A_2 , A_3 сантиметров (если линейка не удлинилась, а укоротилась, то приращения A

Рис. 26. Объемная кубическая решетка в трехмерном пространстве

Рис. 27. Вейлева деформация



надо взять со знаком «минус»; если при смещении из P в восточном направлении линейка удлинилась на A_1 сантиметров, то при смещении на запад, в точку W , она по определению укорачивается на A_1 сантиметров). Эти три числа A_1, A_2, A_3 — ниспосланное богом указание о приращении длины линейки в точке P (бог видит, что при смещении линейки ее длина изменяется в соответствии с этими тремя числами). Распределение вейлева калибровочного поля по пространству выражается значениями чисел A_1, A_2, A_3 в каждой точке пространства.

Людам не дано знать конкретные значения приращений длин линеек. Их знает только бог. Но мы в состоянии воспринять некоторые характеристики распределения приращений.

На рис. 27 показан увеличенный вид сверху на окрестность точки P с рис. 26. Перенесем две идеальные линейки из точки P в точку Q , находящуюся в северо-восточном углу: одну линейку по пути C_1 , а другую — по пути C_2 . Длина линейки, переносимой по пути C_1 , определяется значениями приращений A в точках P и E , а линейки, переносимой по пути C_2 , — значениями A в точках P и N .

Если в окрестности точки P существует деформация масштаба, то длины линеек, доставленных по разным путям в точку Q , должны различаться. Это различие мы можем измерить, сравнивая длины линеек. Но последние зависят от встречавшихся по пути значений приращений A ; следовательно, хотя мы не в состоянии воспринять сами приращения A , мы можем узнать различие чисел A в разных точках.

В математике при помощи разности длин линеек выражают величину деформации масштаба в точке P (точнее говоря, в центральной точке прямоугольника $PEQN$). Таким образом, измеряя изменение приращения длины линейки при замене одного пути переноса на другой, мы можем узнать величину де-

формации в каждой точке, то есть определить в этом месте градиент A .

Итак, калибровочное поле описывается распределением в пространстве трех чисел A_1, A_2, A_3 , значения которых людям неведомы. Но различие величин A в разных точках (градиент A) определяется деформацией по Вейлю, которая, будучи геометрической характеристикой вейлева пространства, является наблюдаемой величиной. Таким образом, если бог произвольно изменяет в каждой точке значения A , но оставляет неизменными градиенты A (то есть следит за тем, чтобы не изменялась наблюдаемая величина — деформация по Вейлю), то люди ничего не заметят. В математике такое изменение величин A называют калибровочным преобразованием. Описанная только что неощутимая для людей игра бога с числами A как раз и представляет калибровочное преобразование. Отсутствие при таком преобразовании наблюдаемых изменений означает калибровочную инвариантность мира людей. Понятно, что калибровочные преобразования можно делать как при существовании деформации масштаба, так и без нее: в любом случае калибровочное преобразование не изменяет мира людей.

Остановимся на вопросе об истинном и фиктивном калибровочных полях. Выше несколько раз подчеркивалось, что если отсутствует деформация масштаба, то в каждую точку вейлева пространства можно поместить идеальную линейку и все такие линейки, по мнению людей, будут иметь одну и ту же длину. В таком случае мы не можем заметить разницы между состоянием, в котором все числа равны нулю, и состоянием с неравными нулю распределенными по пространству числами A . Соответствующее отличное от нуля калибровочное поле фиктивно, его можно устранить сразу во всем пространстве подходящим калибровочным преобразованием.

Но если деформация масштаба существует, то невозможно найти калибровочное преобразование, позволяющее обратить величины A в нуль сразу во всех точках пространства (в противном случае одновременно с A обратились бы всюду в нуль и градиенты A (вейлева деформация). Вместе с тем в таком пространстве невозможно определить пригодный для любых точек масштаб (стандарт длины), так как изменение пути перемещения линеек приводит к изменению их длин. Соответствующее калибровочное поле называют истинным. Итак, калибровочное поле истинно или фиктивно в зависимости от того, существует ли деформация масштаба. В следующем параграфе мы узнаем, что Вейль отождествлял деформацию масштаба с напряженностью электромагнитного поля. Поэтому существование истинного калибровочного поля равносильно существованию электромагнитного поля.

Читатель, видимо, уже обратил внимание, что свойство калибровочного поля быть истинным или фиктивным похоже на соответствующее свойство гравитационного поля. Устранение фиктивного калибровочного поля сразу во всем пространстве при помощи подходящего калибровочного преобразования — точная копия аналогичного свойства фиктивного гравитационного поля, которое можно обратить в нуль сразу во всем пространстве пересадкой в выбранную подходящим образом систему отсчета.

Необходимость введения трех функций точки A (трех компонент векторной функции A) объясняется тем, что наше пространство трехмерно. Если наше пространство-время (четырёхмерное математическое пространство, включающее трехмерное пространство положений и одну временную координату) трактовать как пространство Вейля, то распределение калибровочного поля в нем надо задавать при помощи

четырёхкомпонентной величины A . Добавляемая при этом четвертая компонента A_4 имеет смысл видимого богом приращения с течением времени длины линейки, закрепленной в точке P , на A_4 сантиметров в секунду.

Единая теория поля Вейля

Проницательный читатель, вероятно, уже догадался, какова в общих чертах основная идея вейлевой единой теории поля. Хотя я и понимаю, что для него это излишне, но все же, рискуя показаться утомительным, я объясню здесь идею Вейля.

К свойствам пространства Эйнштейна Вейль добавил придуманное им самим новое геометрическое свойство: в пространстве Вейля сосуществует кривизна (вносимая полем тяжести) и деформация масштаба. Последнюю Вейль связывает в каждой точке пространства с напряженностью электромагнитного поля. Таким образом, вейлева деформация — наблюдаемая величина. А одному только богу известные значения четырех компонент A_1 , A_2 , A_3 , A_4 с точки зрения физики представляют четырехмерный электромагнитный потенциал. В этом — суть идеи Вейля. По Вейлю, такие геометрические свойства пространства-времени, как его кривизна (ее рассматривал уже Риман) и деформация масштаба, с физической точки зрения истолковываются как гравитационное и электромагнитное поля.

Напомним еще раз, что четырехкомпонентная величина, определяющая распределение калибровочного поля, не имеет в каждой точке раз и навсегда заданного значения, ее значение можно изменять при помощи калибровочного преобразования так, чтобы оставалось неизменным распределение по

пространству деформации масштаба*. Такой же неопределенностью страдает и электромагнитный потенциал. Выше подчеркивалось, что допустимы преобразования потенциала, оставляющие в каждой точке неизменными наблюдаемые величины — напряженности электромагнитного поля. Именно потому, что между величиной A и электромагнитным потенциалом имеется указанное сходство, Вейль использовал деформацию масштаба как средство геометрического представления электромагнитного поля. Только благодаря этому физики после Вейля стали называть указанное преобразование электромагнитного потенциала калибровочным. Отсутствие при указанном преобразовании потенциала каких-либо наблюдаемых изменений в физических процессах равносильно утверждению, что *физические законы инвариантны относительно калибровочных преобразований*. Математики же в подражание физикам называют четырехкомпонентную величину A (представляющую калибровочное поле) калибровочным потенциалом.

В своей работе Вейль впервые выдвинул идею о построении единой теории поля; хотя в этом смысле его теория глубоко интересна, она, к сожалению, содержит смертельный для физической теории недостаток: утверждение о невозможности ввести в каждой точке единый для всего пространства стандарт длины при наличии деформации масштаба, то есть при существовании в пространстве электромагнитного поля [46].

На рис. 28 показаны две соседние точки земного экватора P и Q . Общеизвестно, что Земля — гигантский магнит. Южный географический полюс Земли является ее северным магнитным полюсом.

* Термины «калибровочное преобразование», «калибровочное поле» введены Вейлем. — *Прим. авт.*

Если в экваториальной плоскости Земли можно было бы проделать маленькие полости и поместить в них небольшие магнитики, то стрелки всех этих магнитиков указали бы на Южный географический полюс (направления стрелок на рисунке совпадают с направлением земного магнитного поля). Представим себе, что в точке P находятся две идеальные линейки одинаковой длины; одну из них мы перенесем из точки P в точку Q , двигаясь вдоль экватора в восточном направлении, а другую доставим в Q , двигаясь на запад. При встрече линеек в точке Q линейка, двигавшаяся на запад, должна, по теории Вейля, оказаться длиннее линейки, отправленной из P на восток, так как образуемый их путями за-

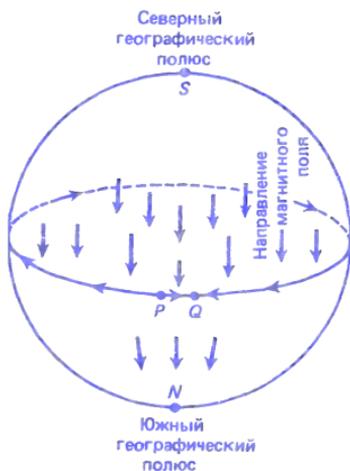


Рис. 28. Кругосветное путешествие линеек

мкнутый контур — экватор — охватывает магнитный поток, направленный на юг.

Рассмотрим предельный случай, когда расстояние PQ равно нулю (точка Q совпадает с P). В этом случае одна из линеек покоится в P , а другая, совершив кругосветное путешествие в западном направлении, возвращается в P с востока. В этом случае линейка-путешественница оказывается длиннее линейки-домоседки. Геометрия Вейля учит нас, что разность длин линеек пропорциональна напряженности магнитного поля, пронизывающего с севера на юг экваториальную плоскость. Иначе говоря, в любом месте экватора длина линейки, совершившей обход вокруг Земли в западном направлении, увеличивается, а в восточном — сокращается. И возникает затруднение: длину какой из линеек использовать в качестве стандарта?

Линейками дело не ограничивается. Вот наудачу взятый пример. Знает ли кто-нибудь, сколько раз за время своего существования обернулась вокруг Земли ее атмосфера? Если Вейль прав, то в ней должны встречаться атомы кислорода и азота с разными диаметрами, зависящими от числа оборотов атома вокруг Земли. Но подобные речи даже слушать невозможно. Теория Вейля находится в вопиющем противоречии с реальностью, источник которого — отождествление деформации масштаба с напряженностью электромагнитного поля.

Поэтому предложенный Вейлем вариант теории единого поля потерпел провал. Но калибровочная теория Вейля открыла перед физикой новые возможности. Современная общая теория калибровочных полей представляет собой развитие и обобщение идей Вейля [47].

ГЛАВА 9 ОБЩАЯ ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ

Роль электромагнитного поля

В последнее время калибровочные поля внезапно привлекли всеобщее внимание. Поэтому я хочу разъяснить в этой главе понятие об обобщенном калибровочном поле. Говоря кратко, эти поля являются как бы перепечаткой, другим изданием вейлева калибровочного поля. Теория обобщенных калибровочных полей предложена примерно четверть века назад в совместной работе Янга и Миллса и независимо от них и практически одновременно в моей работе. Суть этой теории понять легче, если придерживаться моего пути, а не пути Янга и Миллса; к тому же и мне самому так легче рассказывать. Поэтому я начну со своего толкования роли электромагнитного поля.

В этом параграфе мы будем интересоваться движением электрона, учитывая, что в соответствии с квантовой механикой электрон представляет собой пакет волн (электронных волн), и поговорим немного о крайне важном законе — законе сохранения электричества.

Свойство быть заряженным можно рассматривать как физическую характеристику тела (элементарной частицы) только при условии, что свойство наблюдаемо, то есть может быть описано числами, допускающими сопоставление с экспериментом. Кроме того, его нельзя использовать в качестве атрибута элементарной частицы, если соответствующие числа без какой-либо причины увеличиваются или уменьшаются во времени. К счастью, количество электричества не изменяется с течением времени, если заряженное тело не соприкасается

с другими телами, способными отнять у него электрический заряд. Это закон, основанный на длительном опыте человечества, его называют законом сохранения (неуничтожаемости) электричества. Теми же словами этот закон формулируют и для заряженных квантовых объектов, включая электронные волны.

Как нужно поступать, чтобы проследить за изменением во времени состояния одного электрона (имеющего отрицательный электрический заряд) под влиянием силы неэлектромагнитной природы? Для этого надо определить разницу между состоянием электронной волны в какой-то момент времени в точке P и состоянием этой волны в следующий момент времени, когда она распространилась из P в соседнюю точку Q . Иначе говоря, так же как в случае с переносом линеек в калибровочной теории Вейля, надо сравнить идеальное состояние электрона в точке P , которое получилось бы при распространении электронной волны из P в Q без действия внешней неэлектромагнитной силы, и реальное состояние в точке Q , когда электронная волна распространилась из P в Q , испытывая по пути влияние неэлектромагнитной силы. Только так мы можем вычленить влияние силы неэлектромагнитной природы.

Понятно, что если бы электромагнитного поля не существовало, то идеальная волна, не испытывающая по пути из P в Q действия внешней силы, в точке Q имела бы ту же форму, что и в P . Но если в окрестности точек P , Q электромагнитное поле существует, то даже если на пути из P в Q волна не испытывает действия внешних неэлектромагнитных сил, нельзя избежать искажения ее формы за счет электромагнитного поля. Поэтому, хотя по прибытии в точку Q форма волны искажается (по сравнению с формой в точке P) за счет электромагнит-

ного поля, мы говорим про эту искаженную волну, что она находится в том же состоянии, что и волна в точке P . Если известно состояние электронной волны в точке P , то искажение ее формы при распространении в точку Q всецело определяется распределением электромагнитного поля в окрестности P, Q . Если электромагнитное поле неизвестно, то об электронной волне в точке Q , находящейся в том же, как и в P , состоянии, мы ничего сказать не можем. Иными словами, не можем определить движения электрона как физического объекта. Поэтому знание распределения электромагнитного поля совершенно необходимо. Связь искажения электронной волны с распределением электромагнитного поля выражается уравнениями электродинамики; о ней я скажу немного позже.

Итак, взаимнооднозначное соответствие между одинаковыми (в указанном смысле) состояниями электронной волны в точках P и Q устанавливается при помощи электромагнитного поля. Можно сказать, что обязанность (служба) электромагнитного поля заключается в том, чтобы сообщать в точку Q , каким было состояние заряженной частицы (волны) в точке P . Или еще иначе, вспоминая, на чем делался акцент немного выше: *для того чтобы состояние элементарной частицы можно было рассматривать как ее физическую характеристику, совершенно необходимо существование «посланца», называемого электромагнитным полем, обязанность которого — передавать из точки P в точку Q информацию о состоянии заряженной частицы.* Ясно, что такую общественную нагрузку электромагнитное поле получает потому, что обладает особым талантом — оно умеет взаимодействовать с электрическим зарядом частицы.

Повторим сказанное в несколько более строгой форме. Понятно, что при известном электромагнит-

ном поле вносимое им искажение формы электронной волны при переходе частицы из точки P в точку Q зависит от расстояния PQ и от направления, указывающего, где находится точка Q . Поэтому, так же как и при ознакомлении с калибровочной теорией Вейля, представим себе, что пространство заполнено кубической решеткой с шагом один сантиметр, оси которой ориентированы в направлениях восток — запад, юг — север и верх — низ. Относительное искажение электронной волны при смещении вдоль этих направлений на шаг в один сантиметр обозначим соответственно A_1 , A_2 , A_3 . Для большей ясности запишем сказанное в виде математических соотношений. Пусть, например, точка Q находится в одном сантиметре от точки P в восточную сторону. Искажение формы электронной волны получается вычитанием амплитуды исходной волны в точке P из амплитуды идеальной волны в точке Q , «находящейся в том же состоянии».

$$\left(\begin{array}{c} \text{Искажение} \\ \text{формы} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Амплитуда идеальной волны} \\ \text{в точке } Q, \text{ находящейся} \\ \text{в том же состоянии, что} \\ \text{и волна в точке } P \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Амплитуда} \\ \text{исходной} \\ \text{волны в} \\ \text{точке } P. \end{array} \right)$$

Отношение, показывающее, чему равен процент искажения первоначальной волны, и будет относительным искажением, которое, таким образом, равно

$$A_1 = \left(\begin{array}{c} \text{Искажение формы} \end{array} \right) : \left(\begin{array}{c} \text{Амплитуда исходной} \\ \text{волны в точке } P. \end{array} \right)$$

Если точка Q находится не на востоке от P , а на севере, то получится A_2 , а если сверху — то A_3 . Если сюда добавить еще относительное искажение A_4 , которое возникает при фиксировании положения в точке P и изменении (на одну секунду) только времени, то получаемая в итоге четырехкомпонентная величина A будет фактически электромагнитным потенциалом в точке P . В этом, по су-

шеству, и состоит мое изложение электродинамики.

Прослеживая предыдущее рассуждение в обратную сторону, легко понять, какова электронная волна в точке Q , находящаяся в таком же состоянии, в каком она была в точке P . В самом деле, примем, что электромагнитный потенциал в точке P известен. Согласно второй из приведенных выше формул, искажение волны получается умножением амплитуды волны в точке P на A_1 . Зная искажение, из первой формулы находим волну «в том же состоянии».

В первой главе объяснялось, что электромагнитное поле можно рассматривать как среду, передающую электрическую силу от заряда — источника поля к другому заряженному телу, помещенному в поле. Назовем это свойство электромагнитного поля свойством I. А сейчас мы поняли, что электромагнитное поле играет роль переносчика сообщения о состоянии заряженного тела — источника поля. Это его свойство назовем свойством II. Из вышесказанного ясно, что свойство II является следствием свойства I.

Внимательное изучение максвелловских уравнений электромагнитного поля показывает исключительно важную роль закона сохранения количества электричества, который может быть использован как мощный руководящий принцип. Например, из него следует, что электромагнитные волны в вакууме должны распространяться со скоростью света. Далее, если электромагнитные волны рассматривать как ансамбль фотонов, то из закона сохранения электричества следует, что в отличие от электронов и других элементарных частиц фотоны не имеют массы. (Отсутствие у фотонов массы покоя выводится из того факта, что электромагнитные волны распространяются со скоростью све-

та.) С законом сохранения электричества связана также неопределенность электромагнитного потенциала (существование, согласно Вейлю, таких преобразований электромагнитного потенциала, при которых не происходит наблюдаемых изменений физических явлений).

Вейлев принцип калибровочной инвариантности физических законов однозначно определяет форму связи электромагнитного поля с заряженными телами. В этом радикальное отличие электромагнитного взаимодействия от взаимодействия мезонного поля с его источниками — нуклонами. Проведенное выше обсуждение показывает, что поведение электромагнитного поля (поля первого класса) и не может быть иным, чем то, которое мы в настоящее время знаем (полями первого класса я называю поля, переносящие взаимодействия первого класса). Корень этой неизбежности — закон сохранения электричества или эквивалентный ему великий принцип калибровочной инвариантности физических законов.

Мы видели, что электромагнитный потенциал A показывает, каким образом изменяется при переходе из точки в точку форма электронной волны, описывающей одно и то же состояние. Но ведь потенциал A не вполне определен: его можно подвергнуть калибровочному преобразованию. Следовательно, аналогичную неопределенность содержит и форма электронной волны, отвечающей одному и тому же состоянию. Это значит, что когда бог при помощи калибровочного преобразования изменяет величину A , он изменяет также и форму электронной волны, относящейся к одному и тому же состоянию. Из-за того что изменение потенциала и формы электронной волны производится согласованно, мы, люди, судящие о последней только косвенно, через посредство электромагнитного поля, совершенно не в со-

стоянии заметить, что такое изменение произведено. В этом — ключ к пониманию того, каким образом работает принцип калибровочной инвариантности видимого нами физического мира.

В заключение обсудим еще один вопрос. Причина провала теории Вейля — различие длин линеек, перенесенных в данное место по разным путям. Каким же образом разрешается этот вопрос в моем объяснении свойства II электромагнитного поля? Вместо линеек я рассматриваю электронную волну [48]. Если (рис. 29) разделить эту волну на две части W_1 и W_2 , которые, огибая магнитный стержень, вновь соединяются в точке Q , то в Q должно как-то проявиться возникшее при обходе магнита искажение формы этих волн. Величина искажения пропорциональна магнитному потоку, пронизывающему сверху вниз область, охватываемую волнами W_1 и W_2 . Появление различия в длине линеек — большое затруднение для реальной жизни, а различие формы волн может проявиться только в изменении интерференционной картины и не приведет к каким-либо затруднениям.

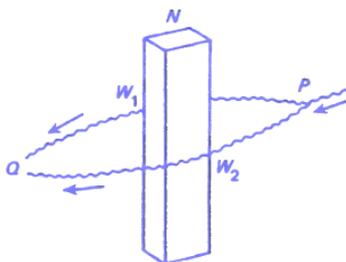


Рис. 29. Эффект Ааронова—Бома

И действительно, 20 с лишним лет назад Ааронов и Бом предсказали существование подобного явления, которое в их честь было названо эффектом Ааронова—Бома. Реальность этого эффекта подтвердил Таномура с сотрудниками из фирмы «Хитати». Таким образом, об этом вопросе можно не беспокоиться.

Информационные поля

С изложенной в предыдущем параграфе точки зрения можно подойти не только к электричеству и электромагнитным волнам; аналогичные соображения применимы и к другим (отличающимся от электрического заряда) физическим величинам.

Обозначим символом a совокупность нескольких физических характеристик какой-нибудь элементарной частицы. Будем считать, что, подобно электрическому заряду, эти характеристики удовлетворяют соответствующим законам сохранения. Тогда можно ввести представление о состоянии частицы, отвечающем набору свойств a . Со свойствами a можно обращаться как с физическими характеристиками частицы (физическими величинами), если их можно выразить при помощи чисел, то есть должно существовать средство для измерения a . Например, в качестве средства измерения электрического заряда, принципиально говоря, используют действующую на него силу; агентом, передающим эту силу, является электромагнитное поле. Рассуждая по аналогии, приходим к заключению, что должны существовать поля, источниками которых служат свойства a . Эти поля порождаются источниками a и передают силу, действующую на a ; их можно использовать для наблюдения состояния элементарной частицы, имеющей свойства a . Указанные поля сообщают нам о состоянии элементарной частицы. Они позволяют,

кроме того, построить в точке Q , соседней с точкой P , состояние частицы (имеющей свойства a), «одинаковое» с ее состоянием в точке P . Таким образом, рассматриваемые поля устанавливают взаимно однозначное соответствие между «одинаковыми состояниями» в точках P и Q . Последнее утверждение обосновывается аналогично выводу свойства II электромагнитного поля. Итак, обсуждаемые поля можно трактовать как посланцев, передающих из точки P в точку Q (посредством связи со свойством a) информацию о состоянии частицы. Поэтому их можно назвать информационными полями, сопутствующими свойствам a , или просто информационными a -полями.

Если еще раз проследить за аргументацией, приведшей нас к понятию информационных a -полей, то станет ясно, что существование таких полей, сопутствующих свойствам a , обеспечивает нам возможность проследить в пространстве и времени за поведением частицы, имеющей свойства a , с которыми мы хотим обращаться как с физическими величинами. Таким образом, информационные поля — физический фундамент реального проявления свойств a .

Теория информационных a -полей строится по аналогии с максвелловой теорией электромагнитного поля. Все рассуждения совершенно параллельны, надо только заменить электрический заряд на совокупность свойств a .

Аналогия с электромагнитным полем показывает, что одному свойству a должен соответствовать четырехкомпонентный потенциал (такой же, как потенциал электромагнитного поля), который описывает распределение информационного поля. Уравнения поля, определяющие поведение этого потенциала, и способ связи между частицей, несущей свойство a , и полем (потенциалом), сопутствующим свойству a , практически полностью определяются законом со-

хранения свойства a (образец для данного случая — электромагнитное поле). Такая полная определенность (отсутствующая у мезонных и подобных им полей) — большое достоинство полей первого класса.

Из аналогии с электромагнитным полем понятно, что волны информационного a -поля должны распространяться в вакууме со скоростью света c . Далее предположим, как мы это делали выше при рассмотрении эффекта Ааронова—Бома, что волна частицы, имеющей свойство a (в соответствии с квантовой механикой здесь мы рассматриваем частицу как волну), сначала разделена на две части, которые потом снова собираются вместе. Если у двух частей разделенной волны возникает различие формы, то это различие надо понимать как указание на то, что в области, охватываемой путями распространения обеих волн, существует истинное информационное поле. Это можно рассматривать как определение истинности информационного поля.

В заключение хочу обратить внимание на следующее. Если свойством a считать размер элементарной частицы, то информационное a -поле — не что иное, как калибровочное поле Вейля. По этой причине рассматриваемые здесь информационные поля называют обобщенными калибровочными полями. Поскольку они не имеют никакого отношения к масштабам и калибровке, лично мне не нравится называть их калибровочными. Но если вспомнить историю развития этого понятия, то не остается ничего иного, как согласиться. Поэтому ниже мы будем называть информационные a -поля калибровочными полями, сопутствующими свойствам a . Это просто другое название для полей, которые я сам для себя называл полями первого класса.

Обобщенные калибровочные поля

Выше я рассмотрел калибровочное поле в частном случае, когда частица имеет только одно свойство a . Случай обобщенных калибровочных полей более сложен.

Рассмотрим не одну, а совокупность характеристик a_1, a_2, \dots, a_n и подумаем, как проследить в пространстве и времени за состоянием частицы, имеющей такое сложное n -компонентное свойство. Нам надо ввести n потенциалов, отвечающих каждой из характеристик. Поскольку потенциалы четырехкомпонентны, должно существовать калибровочное поле, имеющее $4n$ компонент.

Отдельные характеристики a_i , входящие в состав сложного n -компонентного свойства, так же как электрический заряд, удовлетворяют каждая своему закону сохранения. Если бы эти характеристики совершенно не зависели друг от друга, например, если бы при каком угодно состоянии характеристики a_1 (скажем, при любом значении числа, выражающего интенсивность свойства a_1) соответствующее число для характеристики a_2 можно было бы выбирать произвольно, то вопрос решался бы легко. Мы имели бы фактически изданный в n экземплярах случай с одной характеристикой a . Это было бы просто существование без интерференции n четырехкомпонентных потенциалов, очень похожих на потенциал электромагнитного поля.

Мы рассмотрим другой, более интересный случай, когда характеристики частицы a сложным образом связаны друг с другом. Соответственно должны быть сложно перепутаны все компоненты полного калибровочного поля. Я сказал «перепутаны», но чтобы ощутить, что же происходит в действительности, полезно обсудить конкретный пример вращательного движения.

Сначала проследим за смещением точки при повороте. На рис. 30 показана сфера с центром в точке O , OX , OY , OZ — три взаимно перпендикулярных диаметра этой сферы.

Повернем сферу на 90° вокруг оси OX в направлении, показанном на рисунке стрелкой. Если смотреть на шар издали со стороны точки P , то это будет поворот по часовой стрелке. Назовем его R_1 . В результате поворота R_1 северный полюс сферы N сместится в точку Q . Далее произведем поворот на 90° вокруг оси OY в направлении, показанном стрелкой (это поворот против часовой стрелки, если смотреть на сферу издали со стороны точки Q). Такой поворот назовем R_2 . На этот раз точка N , совпадающая с точкой Q , находится на оси вращения и потому неподвижна. Окончательно в результате выполнения двух описанных поворотов точка N переходит в положение Q .

Произведем теперь описанные выше повороты в обратном порядке: сначала поворот R_2 , а затем — R_1 . На этот раз точка N перейдет в точку P . Таким образом, при изменении очередности изменяется результат последовательного выполнения операций R_1 и R_2 (об этом явлении говорят, что операции R_1 и R_2 некоммумутативны, то есть что они непостоя-

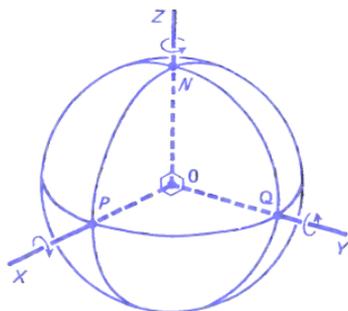


Рис. 30. Смещение точки при поворотах сферы

новочны). Обозначим R_3 поворот вокруг оси OZ . Операция R_3 тоже не коммутирует с операциями R_1 и R_2 . В этом смысле операции R_1, R_2, R_3 не являются независимыми, между ними имеется сложная взаимосвязь. Запомним этот факт.

Элементарные частицы, подобно Земле и другим планетам, «обращаются вокруг своей оси». Имея в виду это явление, говорят, что частицы обладают спином. Спиновое состояние характеризуют направление оси и угловая скорость вращения. На чертеже спин обычно изображают стрелкой, например показанной на рис. 31 стрелкой OP , имеющей определенное направление относительно фиксированных взаимоперпендикулярных осей OX, OY, OZ . Ось OP направлена вдоль оси «вращения» частицы. Стрелка на оси OP ориентируется так, что она указывает направление смещения правого винта при его вращении в ту же сторону, в какую «вращается» частица. Длина стрелки указывает угловую скорость вращения.

Рассмотрим проекции стрелки S_1, S_2, S_3 на оси OX, OY, OZ . Если на элементарную частицу не действуют внешние силы, то спиновое состояние не изме-

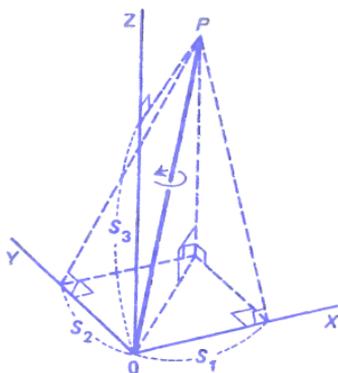


Рис. 31. Графическое изображение спина

няется и проекции S_1 , S_2 , S_3 сохраняют определенные численные значения. Это — закон сохранения спина. Таким образом, три компоненты S можно рассматривать как пример сложного свойства a , о котором говорилось выше при изложении общей теории (в данном случае частица имеет трехкомпонентное свойство).

Но мы видим, что вращательные движения сложным, запутанным образом связаны между собой. Поэтому в квантовой механике компоненты спина S_1 , S_2 , S_3 не могут принимать независимые друг от друга значения. Предположим, например, что у некоторой элементарной частицы величина S_3 имеет определенное значение $S_3 = 5$. Для удобства последующего изложения мы будем говорить, что «частица находится в собственном состоянии с определенным значением проекции спина S_3 , равным 5». В общем случае, когда величина S_3 принимает некоторое определенное значение, мы будем говорить, что частица находится в «собственном состоянии S_3 ».

Чему равно значение проекции S_1 , когда частица находится в собственном состоянии S_3 с собственным значением $S_3 = 5$? Ответа на такой вопрос не существует. Причина в том, что собственное состояние S_3 является смесью собственных состояний S_1 , в которой состояния с собственными значениями $S_1 = 1, 2, \dots$ и т. д. взяты в некотором конкретном весовом отношении. Одно собственное состояние S_3 является смесью всевозможных собственных состояний S_1 ; эта смесь конкретная в том смысле, что веса (доли, пропорции) смеси однозначно определены.

Точно так же не имеет ответа вопрос о том, каково значение проекции S_2 . Суть в том, что при определенном значении проекции спина S_3 значения проекций S_1 , S_2 совершенно невозможно определить. Если же определенное значение принимает проекция S_1 , то тогда аналогичная ситуация возникает

относительно проекций S_2, S_3 . Это следствие некоммутативности операций R_1, R_2, R_3 .

Вернемся к основной теме. Если характеристики a_1, \dots, a_n не являются взаимно независимыми, а, подобно спину, не коммутируют друг с другом, то между характеристиками появляется вытекающая из непрерывности взаимосвязь. Тогда все характеристики частицы не могут одновременно принимать определенные значения. Пусть, например, частица имеет значение характеристики $a_1=5$. Тогда, так же как и в случае со спином, значение, например, характеристики a_2 становится неопределенным. Причина и на этот раз в том, что собственное состояние a_1 является смесью с конкретными пропорциями собственных состояний a_2 со всевозможными значениями характеристики a_2 .

Примем теперь, что находящаяся в таком состоянии частица (лучше сказать, волна элементарной частицы) расположена в точке P . Чтобы проследить за движением частицы, имеющей столь сложную природу, надо сначала определить (подобно тому, как мы делали в случае с заряженной частицей), какой смысл имеют слова, что эта частица «в том же состоянии» перешла в соседнюю точку Q . Если вспомнить являющийся для нас образцом случай электромагнитного поля, то характер ответа легко понять. Именно разумно считать, что волна частицы в точке Q будет находиться в том же состоянии, в каком она была в точке P , если из P в Q частица распространялась только под влиянием калибровочного поля, порождаемого свойствами a . Тогда форму волны «того же состояния» в точке Q определяет $4n$ -компонентное калибровочное поле, окружающее частицу в окрестности точек P, Q .

Попробуем теперь понять, как искажают форму волны элементарной частицы те четыре компоненты $4n$ -компонентного калибровочного поля, которые

сопутствуют, например, характеристике a_2 . Эти компоненты, будучи связаны со свойством a_2 , передают силу, действующую на волну элементарной частицы. Но последняя не описывает собственного состояния a_2 , поэтому на нее со стороны компонент калибровочного поля, связанных с a_2 , будут действовать силы, разные для разных собственных состояний a_2 , образующих рассматриваемую волну. В результате по прибытии волны частицы в точку Q изменятся пропорции, в которых были смешаны в исходной волне (в точке P) разные собственные состояния a_2 . Это значит, что по прибытии в точку Q значение a_1 не останется неизменным, форма волны исказится, например, так, что будет представлять собственное состояние a_1 со значением $a_1 = 4$.

Сначала величина a_1 у частицы равнялась 5, а потом уменьшилась до 4; куда же девалась разница? Мы знаем, что каждая из величин a удовлетворяет закону сохранения; значит, существует нечто, забравшее себе разницу. Этим «преступником» должно быть то, с чем взаимодействовала частица в то время, когда произошла пропажа части свойства a_1 . Но она взаимодействовала с компонентами калибровочного поля, сопутствующими свойству a_2 !

В случае электромагнитного поля, которое мы приняли за образец, такого явления не было. Электромагнитное поле, будучи связанным с имеющимся у частицы электрическим зарядом, действует на частицу с некоторой силой, но не отнимает у нее электрический заряд и не сообщает частице заряда. Иначе говоря, электромагнитное поле электронейтрально.

Но в нашем эпизоде оказалось, что компоненты калибровочного поля, сопутствующие характеристике a_2 , захватили одну единицу свойства a_1 . Таким образом, контактируя с частицей, калибровочное поле ее «обидело». Отняв у частицы свою толику свойства

a_1 , поле, сопутствующее a_2 , может теперь само порождать калибровочное поле, сопутствующее a_1 . Итак, одни компоненты калибровочного поля могут порождать своих «собратьев» — другие компоненты того же поля. Это характерная особенность случая, когда многокомпонентное свойство a некоммутативно (компоненты свойства a влияют друг на друга подобно компонентам спина). Поля такого типа называют некоммутативными полями. Как мы видели, им присуще свойство самопорождения, которое отсутствует у калибровочных полей, сопутствующих, подобно электромагнитному, однокомпонентному свойству или даже n -компонентному, но такому, что разные компоненты друг на друга не влияют.

Однако и в рассмотренном весьма сложном случае многокомпонентного свойства a , так же как и в примере с электромагнитным полем, можно исходя из закона сохранения величин a однозначно вывести, во-первых, математическую природу калибровочных полей; во-вторых, характер связи калибровочных полей с их источниками — частицами, имеющими свойства a ; в-третьих, уравнения поля, управляющие поведением калибровочных полей. Закона сохранения величин a для такого вывода достаточно, потому что калибровочные поля — поля первого класса; подобного достоинства нет у других полей. Получаемые на этом пути уравнения калибровочных полей имеют упоминавшееся выше свойство самопорождения.

Понятие о калибровочном поле, обсуждавшееся выше, — максимально широкое обобщение понятия электромагнитного поля. Это общая теория полей первого класса. Все поля первого класса, даже те, которые пока не открыты, укладываются в рамки такой теоретической схемы. Значит, к ней должна относиться также эйнштейновская теория гравитационного поля. И действительно, выше уже отмеча-

лось, что эйнштейновская теория — частный случай этой общей теории.

Как теория Янга—Миллса, так и рассмотренная выше общая теория калибровочных полей появились на свет немного преждевременно. Во время создания общей теории не могло быть и речи о ее практическом применении, так как свойства частиц a были еще недостаточно открыты и разъяснены. Поэтому общая теория, хотя и красивая по форме, в течение 10 лет рассматривалась как сугубо академическое бесполезное мечтание. Приятели передавали мне, что даже очень известные зарубежные физики, лауреаты Нобелевской премии, высказывались в мой адрес: «Почему Утияма без конца занимается не имеющими никакого отношения к действительности полями?» Такова была типичная оценка моей работы в то время.

Но эта теория привлекла всеобщий интерес после того, как Вайнберг, Салам и Глэшоу добились успеха в попытке единым образом рассмотреть слабые и электромагнитные силы как калибровочное поле. Поэтому ниже я дам краткий очерк практического применения калибровочных полей после создания теории Вайнберга—Салама—Глэшоу.

Практическое применение теории калибровочных полей

Мой интерес к полям первого класса (калибровочным полям) объясняется их особым очарованием, состоящим в том, что способ их связи с частицами — источниками поля полностью, без какого бы то ни было произвола, определяется некоторым фундаментальным принципом. Не знаю, как в феноменологии, но в фундаментальных физических законах все силы должны передаваться по-

лями первого класса — так думал я тайно все годы, на это надеялся и этого желал.

В главе шестой я уже говорил, что в настоящее время быстро развивается понимание физических свойств кварков и лептонов, в частности значений их масс и электрических зарядов. За состоянием частиц как физических объектов можно следить только в том случае, если существуют поля первого класса (калибровочные поля), сопутствующие свойствам частиц. Это естественное следствие изложенной выше общей теории, которая говорит нам также, что фундаментальные частицы обмениваются между собой соответствующими силами благодаря калибровочным полям. В настоящее время нам известны фундаментальные силы четырех видов. Естественно думать, что именно они и передаются этими калибровочными полями. Попробую показать, что нечто такое действительно происходит.

Одно из фундаментальных взаимодействий, электромагнитное, передается электромагнитным полем — прототипом калибровочных полей. Поле тяжести, как указано в конце предыдущего параграфа, является некоммутативным калибровочным полем. В середине 1960-х гг. Вайнберг, Салам и Глэшоу добились успеха в объединении электромагнитных и слабых сил в одно 16-компонентное калибровочное поле. Остановимся на их теории подробнее. Выше говорилось, что слабые силы связывают между собой лептоны, а также лептоны с барионами и мезонами. Слабые силы гораздо меньше действующих между этими же частицами электромагнитных сил, а радиус слабого взаимодействия меньше одной тысячной радиуса действия ядерных сил.

В то же время электрические силы, обратно пропорциональные квадрату расстояния, формально говоря, простираются сколь угодно далеко, то есть

имеют бесконечно большой радиус действия. Поэтому на первый взгляд (ввиду различия силы взаимодействия и величины радиусов действия сил) надежда на успех единого рассмотрения электромагнитного и слабого взаимодействий выглядит беспочвенной.

Чтобы преодолеть это затруднение, Вайнберг и другие воспользовались очень необычным полем, так называемым полем Хиггса, и рассмотрели 16-компонентное калибровочное поле (совокупность четырех векторных полей, каждое из которых, подобно электромагнитному потенциалу, имеет по четыре компоненты). Выше при изложении общей теории не раз подчеркивалось, что калибровочное поле распространяется со скоростью света. Если рассматривать его как ансамбль частиц, подобных фотонам, то массы соответствующих частиц (квантов поля) равны нулю; поэтому силы, передаваемые калибровочным полем (мы будем называть их калибровочными силами), так же как электромагнитные силы, имеют бесконечно большой радиус действия. Таким образом, непосредственно истолковать слабые силы как калибровочные невозможно.

Оказалось, однако, что это препятствие можно устранить при помощи хиггсова поля. Вайнберг и другие постулировали, что с хиггсовым полем связаны не все 16, а только 12 компонент полного калибровочного поля (три векторных поля из четырех). Характер связи с хиггсовым полем таков, что кванты трех связанных с ним полей становятся тяжелыми (приблизительно в 100 раз тяжелее протона). В результате радиус действия сил, передаваемых этими тремя векторными полями, «поросшими мхом хиггсова поля», становится очень коротким, таким, каков он в эксперименте. Одновременно сильно уменьшается по сравнению с электромагнитными величина передаваемых этими полями сил. А чет-

вертое векторное калибровочное поле (оставшиеся четыре компоненты полного 16-компонентного калибровочного поля), избежавшее связи с хиггсовым, рассматривается как электромагнитное. В этом основной пункт аргументации Вайнберга, Салама и Глэшоу.

Можно сказать, что их теория — своего рода единая теория сил. За свою работу эти трое физиков несколько лет назад получили Нобелевскую премию.

Нам осталось рассмотреть силы взаимодействия кварков. В настоящее время считают, что они передаются калибровочным полем, сопутствующим трем «цветам» кварков. Соответствующие калибровочные силы — это глюонные силы, действующие между кварками. Но при разрушении нуклонов в результате бомбардировки их другими элементарными частицами еще ни разу не наблюдалось, чтобы наружу вылетели в свободном виде составляющие нуклоны кварки. Силы, склеивающие кварки в нуклоны, так крепки, что извлечь кварки из нуклонов в настоящее время совершенно невозможно. В отличие от всех остальных сил эти силы не ослабевают при увеличении расстояния между кварками, а на сколь угодно большом расстоянии остаются постоянными по величине.

А при уменьшении расстояния между кварками глюонные силы ослабевают. Так, в результате исследования внутреннего строения нуклонов при помощи бомбардировки их очень быстрыми электронами выяснено, что кварки движутся как свободные частицы. Таким образом, сила взаимодействия кварков возрастает при попытке разъединения последних, когда же расстояние между кварками становится гораздо меньше радиуса нуклона, эта сила уменьшается настолько, что не возникнет большой ошибки, если ее вообще принять равной нулю. Дру-

того примера сил со столь необычными свойствами науке не известно.

Но свойства глюонных сил полностью объясняются, если принять, что эти силы передаются некоммутативным калибровочным полем, сопутствующим имеющемуся у кварков «цвету». Гипотеза о калибровочной природе глюонных сил позволяет также построить теорию строения мезонов (образованных из пар кварков), хорошо согласующуюся с экспериментальными фактами. Поэтому в настоящее время общепринято, что действующие между кварками глюонные силы передаются некоммутативным калибровочным полем.

Итак, силы всех основных четырех видов можно вывести из калибровочных полей. Но электромагнитные и слабые силы понимаются теперь единым образом, а силы остальных двух видов нужно выводить каждую из своего особого калибровочного поля. Поэтому, естественно, возникает мысль, нельзя ли вывести все эти силы из однотипного большого набора калибровочных полей.

Сейчас распространилась эпидемия попыток вывода сил трех видов — глюонных, электромагнитных и слабых — из одного многокомпонентного калибровочного поля. Эту деятельность называют теорией великого объединения. Расширение указанного поля, с тем чтобы включить в него и силу тяжести, называют теорией сверхвеликого (супер) объединения, возможности которого тоже энергично исследуются. Если эти попытки приведут к успеху, то должны найти объяснение многочисленным волнующие нас сегодня проблемы; например, почему существует наблюдаемое в настоящее время соотношение между четырьмя видами сил, почему фундаментальные частицы имеют именно те массы, которые наблюдаются на опыте, и т. п.

Вообще-то, вероятно, мне надо было бы здесь

рассказать, каково современное состояние вопроса о великом и сверхвеликом объединении взаимодействий на основе понятия о калибровочных полях, какие достигнуты успехи, в чем затруднения. Но я не делаю этого, потому что в серии «Иванами сэнсё» (т. 166) выходит книга Судзуки и Камаэ «Мир элементарных частиц», в которой подобные вопросы рассмотрены ясно и точно. Думаю, что вместо моих неумелых объяснений лучше будет прочитать книгу этих авторов*. Поэтому я прерываю свое изложение вопросов применения теории калибровочных полей.

* Советским читателям эта книга неизвестна. С названной Р. Утиямой темой можно познакомиться по кн.: Волошин М. Б., Тер-Мартirosян К. А. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. М., Энергоатомиздат, 1984; Элементарные частицы и компенсирующие поля. Сб. статей. Под ред. Д. Иваненко. М., Мир, 1964; Березинский В. С. Объединенные калибровочные теории и нестабильный протон. — Природа, 1984, № 5. — *Прим. ред.*

ГЛАВА 10

ГОРЬКИЕ СОЖАЛЕНИЯ

Выше я разъяснил понятие обобщенного калибровочного поля и подробно изложил аргументацию, которая приводит к этому понятию. А здесь мне хочется рассказать об обстановке, в которой создавалась рассмотренная выше общая теория, в частности откровенно поведать о событиях своей личной жизни, связанных с очень неприятными для меня воспоминаниями, досадой на себя и сожалениями о прошлом. Прошу понять меня правильно: я не отношусь к числу любителей бравировать своими пороками и не мазохист, который специально сообщает другим о своих неудачах, чтобы потом насладиться насмешками над собой. Но воспоминания о давно минувших днях, которыми я собираюсь поделиться, сейчас могут пригодиться молодым людям, в частности послужить хорошим предупреждением тем из них, кто решил посвятить себя научной работе. Поэтому, не страшась упреков в бесконечно нудном повторении одного и того же, со спокойной решимостью приступаю к этой печальной для меня повести.

В конце января 1954 г. я получил приглашение в Принстонский институт высших исследований и в сентябре того же года отбыл в США. Заграничная жизнь была для меня в новинку, поэтому я намеревался совершить путешествие по США с осмотром достопримечательностей и, хотя в этом и стыдно признаться, планировал в основном развлекаться, а не работать. Но как вернуться на родину, не написав в Штатах ни одной статьи? Ведь это было бы позором для японца. Чтобы избежать столь постыдного финала, я решил, что поступлю умно, если еще до отъезда заготовлю одну-две работы. Конкрет-

но я имел в виду свой замысел теории обобщенных калибровочных полей.

Читатель, видимо, уже устал от неоднократных напоминаний, что я ощущал неудовлетворенность (с формально-теоретической точки зрения) господствовавшей мезонной теорией. Появлявшиеся в связи с обнаружением новых элементарных частиц другие теории, подобно теории Юкавы, тоже были более или менее неудовлетворительны. В теоретических исследованиях взаимодействий элементарных частиц тогда полагались только на метод проб и ошибок. Нельзя ли найти какой-то сильный руководящий принцип, при помощи которого удалось бы вывести форму взаимодействия элементарных частиц так же, как это делается в случае взаимодействия гравитационного поля с веществом и электромагнитного поля с электрически заряженными частицами? В то время я постоянно думал об этом, и к моменту, когда решился вопрос о моей поездке в США, мне уже была ясна в общих чертах суть моей теории. Оставалось только записать с использованием конкретных математических формул те идеи, о которых рассказано в предыдущей главе. Эта работа прошла очень гладко. Думаю, каждый испытал в жизни нечто подобное: уравнения, которые ты должен вывести, как бы сами собой раскрываются именно в той форме, в какой было задумано; дело идет как по маслу, каждый день трудишься в радостном возбуждении. В таком вдохновенном состоянии я пребывал месяца два.

В том же году (в начале лета 1954 г., насколько помню, это был не то май, не то июнь) я доложил эту работу на маленьком семинаре, устроенном в Институте фундаментальной физики Токийского университета. Вспоминаю резкую отповедь, с которой выступил в конце заседания один мой знакомый физик (ныне горячий поклонник калибровочной тео-

рии): «Мы знаем, что в случае электромагнитного поля сначала были найдены уравнения поля и только потом, после их тщательного изучения, пришли к выводу, что они инвариантны относительно калибровочного преобразования. Утияма же, наоборот, берет в качестве исходного пункта калибровочную инвариантность и из нее выводит уравнения поля. Такой подход антиисторичен и потому ошибочен».

Это заявление ясно показывает, что человек не понял моей идеи. Разрабатывать новые пути можно, только отринув общепринятую ортодоксальную точку зрения, подобную той, которую высказал мой знакомый; следовать за устоявшимися воззрениями часто бывает полезно, но на этой дороге новую точку зрения не найдешь. Именно так я думал в глубине души, но, полагая, что полемика бесполезна, не стал с ним спорить, а просто не ответил на его замечание. Я не хочу выставить его здесь на осмеяние; просто привел его слова как типичную для того времени реакцию людей на идею калибровочного поля.

Приехав в начале сентября в Принстон, я с женой в тот же вечер отправился с визитом к моему учителю профессору Кобаяси, дом которого был рядом с домом, в котором нас поселили. У Кобаяси я учился в Осакском университете; ныне он профессор Токийского университета, а тогда уже в течение года жил вместе с семьей в Принстоне в качестве приглашенного научного сотрудника. Во время продолжительной приятной беседы с четой Кобаяси я признался учителю в нечестных замыслах и раскрыл свой совершенно секретный план: поскольку я еще до приезда в США заготовил статью, то ничего не случится, если я здесь немного побездельничаю и развлекусь. Во время обсуждения темы моей статьи учитель обронил: «Вещи, очень похожие на твои, недавно опубликовал Янг».

Янг — чрезвычайно талантливый физик, впоследствии совместно с Ли получивший Нобелевскую премию. Его специальность — физика элементарных частиц, и он хорошо знал также физику твердого тела; в то время был профессором в Принстонском институте. Но насколько мне было известно, теория калибровочных полей не входила в круг его интересов; поэтому я считал, что каким бы талантливым Янг ни был, эта идея вряд ли придет ему на ум.

Хоть это и невежливо по отношению к учителю, но про себя я подумал, что учитель, наверно, что-нибудь не так понял.

Однако спустя несколько дней в своем институтском почтовом ящике я обнаружил оттиск статьи Янга. Достаточно было раскрыть его, чтобы увидеть одну за другой хорошо мне известные математические формулы, только в других обозначениях. Даже не читая текста, а лишь взглянув на последовательность формул, я понял общий смысл статьи Янга: то, что было в ней написано, почти совпадало с содержанием моей статьи. Для меня это было как гром среди ясного неба.

В предыдущих главах подробно объяснялось, что моя теория обобщенных калибровочных полей возникла, с одной стороны, на основе общей теории относительности, а с другой — на основе физики элементарных частиц. Я уже не раз говорил, что в то время интересы большинства ученых были сосредоточены на физике элементарных частиц, а теории относительности и связанные с ней теории единого поля почти никого не привлекали, к этим темам было стойкое предубеждение, и ими занималось очень мало народу. Теорией относительности и единой теорией поля интересовались в основном астрономы, математики и лица, в нерешительности «блуждавшие» вблизи границы физики и матема-

тики. А лучшие ученые-физики того времени, в частности начинающие молодые таланты, отворачивались от этих предметов как от старомодных. Такова была всемирная тенденция, ни Япония, ни США не были исключением.

Поэтому я полагал, что разработкой теории, подобной моей, стимулами для создания которой были две столь различные области физики, вряд ли во всем мире займется кто-либо, кроме меня самого. Лелея в душе подобные мысли, я был совершенно спокоен и думал: приеду в Америку, переведу статью на английский, потихоньку напечатаю в научном журнале и нечего беспокоиться, что меня кто-нибудь перегонит.

И вот в таком-то высокомерном состоянии я внезапно получил столь сокрушительный удар, что мое изумление и упадок духа трудно выразить словами или описать пером.

Совершенно подавленный, я не стал даже просматривать еще раз ни статью Янга, ни свою привезенную из Японии рукопись, а оставил все как есть. Но в марте следующего года решено было продлить срок моего пребывания в Принстоне еще на год, и я захотел сделать какую-нибудь большую работу. Дело в том, что за предыдущие полгода я опубликовал всего одну статью, и то совместно с американцем; поэтому мне было очень стыдно. В это время мне постепенно начало казаться, что рукопись привезенной из Японии статьи спит в моем чемодане совершенно незаслуженно. Тогда же я в отвратительном настроении перечитал все-таки еще раз присланный мне Янгом оттиск его статьи (она в 1954 г. опубликована в «Физикл ревью» — журнале американского физического общества). И тут-то я наконец понял, какого я сваял дурака: ведь между моей статьей и статьей Янга была большая разница!

В моей статье, как разъяснено в предыдущей главе, содержалась общая теория калибровочных полей. А в статье Янга сообщалось об открытии одного некоммутативного калибровочного поля частного вида. В моей статье в качестве приложений, кроме электромагнитного, указано еще и гравитационное поле, которое тоже укладывается в рамки общей теории. А в статье Янга характерный для гравитационного поля символ g даже ни разу не употреблен. Поэтому я перевел свою рукопись на английский и добавил еще один параграф, в котором указал, что работу Янга надо понимать как частный случай моей общей теории. Ссылка на Янга объясняется тем, что его статья была уже опубликована в американском физическом журнале. Моя работа выполнена без влияния Янга; его статью я увидел уже после того, как моя работа была завершена. Но поскольку перед посылкой своей статьи в печать я видел статью Янга, совершенно не цитировать ее было бы несправедливо. Ведь как бы то ни было, в работе Янга открыт еще один нетривиальный пример некоммутативного калибровочного поля; честь этого открытия принадлежит профессору Янгу и работавшему под его руководством Миллсу.

В настоящее время термин «поля Янга — Миллса», которым увековечены имена этих авторов, употребляется в качестве синонима для обобщенных калибровочных полей. Для меня, совершенно независимо создавшего теорию таких полей, этот факт крайне огорчителен. Но я сам во всем виноват, упрекать мне некого. Я должен был сразу после завершения статьи в конце марта 1954 г. опубликовать ее в японском научном журнале, но не сделал этого; так что причина моего теперешнего злополучия — слишком высокое мнение о своей рукописи, которым было переполнено в то время все мое суще-

ство. Колумб велик тем, что он первым поставил куриное яйцо. Если после этого кто-то, пусть независимо, поставит на столе даже гораздо больше куриного страусиное яйцо, он будет всего лишь последователем*.

Моя статья поступила в журнал «Физикл ревю» летом 1955 г. и опубликована в нем в 1956 г. В то время она совершенно не привлекла внимания научной общественности. Единственное место, где она имела хоть какой-то резонанс, — это международная конференция по теории относительности, где моя новая точка зрения на гравитационное поле стала темой небольшого обсуждения. В Японии же никто (о Юкаве и Томонаге и говорить нечего) не заинтересовался моей работой. С тех пор в изучении элементарных частиц предпринимались все новые попытки, и, наконец, возобладали теория кварков. После этого интерес физиков всего мира снова переместился: центральной проблемой опять стали считать природу трех сил мира элементарных частиц (в том числе силы взаимодействия кварков) и силы тяжести.

В предыдущей главе говорилось, что в 60-х гг. Глэшоу, а вслед за ним Салам и Вайнберг, используя теорию обобщенных калибровочных полей, добились успеха в единой трактовке электромагнитного поля и поля, передающего слабые силы. После этого очень многие стали заниматься теорией великого объединения и суперобъединения. Таким обра-

* Среди физиков устное сообщение на небольшом научном семинаре не считается оформленной по всем правилам публикации, потому что не остается доказательств. Датой опубликования статьи считают год и день принятия ее к делопроизводству в научном журнале, если потом она в нем опубликована. Это общепризнанное соглашение, принятое не только в Японии, но и во всех остальных странах. — *Прим. авт.*

зом, калибровочная теория в последние годы привлекла всеобщее внимание, результатом чего явился быстрый прогресс в теории кварков и в понимании различных свойств кварков и лептонов. Думаю, что теория кварков и калибровочная теория — это два великих шедевра в физике второй половины XX в. Закончить эту книгу я хотел бы пожеланием, чтобы они вечно сияли на небосклоне истории физики.

ПРИМЕЧАНИЯ И КОММЕНТАРИИ ПЕРЕВОДЧИКА

1. Русский перевод (У т и я м а Р. Теория относительности. М., Атомиздат, 1979) тоже не залежался на прилавках книжных магазинов.

2. Ради простоты автор отвлекается от сравнительно медленного вращения Земли.

3. Вопрос об относительном вкладе Ньютона и Гука в теорию тяготения подробно рассмотрен в кн.: В а в и л о в С. И. Исаак Ньютон. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1945; К о б з а р е в И. Ю. Ньютон и его время. М., Знание, 1978 (серия «Физика»). О Гуке см.: Б о г о л ю б о в А. И. Роберт Гук. М., Наука, 1984; Квант, 1985, № 7, с. 16—22.

4. Для простоты автор отвлекается от сравнительно слабого для маленьких шариков эффекта электрической индукции.

5. Не следует отождествлять философскую категорию «материя» с физическим понятием о веществе: электрическое поле, не будучи с физической точки зрения веществом, с философской точки зрения, несомненно, материально. Можно сказать, что эта книга посвящена объяснению различия между физическими понятиями вещества и поля. Кратко (и не вполне точно) говоря, в современной физике к веществу причисляют те элементарные частицы, которые можно остановить (масса покоя частиц вещества не равна нулю). Электрическое поле является разновидностью электромагнитного поля (см. ниже), соответствующие которому элементарные частицы, фотоны, остановить невозможно (масса покоя фотонов строго равна нулю).

6. Имеется в виду пространство, в котором отсутствует вещество. По поводу определения понятия о веществе см. примечание 5.

7. См. примечание 2.

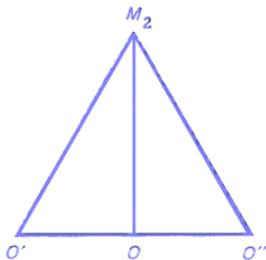
8. Такую гипотезу высказал также крупный ирландский физик Джордж Фицджеральд (умер сравнительно молодым — на 50-м году жизни — в 1901 г.). Гипотезу о сокращении масштабов называют гипотезой Лоренца — Фицджеральда. О Фицджеральде см.: Б о л о т о в с к и й Б. М. Оливер Хевисайд. М., Наука, 1985.

9. Появление в этой формуле величины k не означает, конечно, что уже во время подготовки своего опыта Майкельсон

догадывался о том, что коэффициент пропорциональности между T_1 и T_2 имеет физический смысл. Коэффициент сокращения масштабов можно получить путем следующих, например, рассуждений, основанных на обычном (галилеевом) правиле сложения скоростей.

Луч света L_1 затрачивает на прямое прохождение отрезка $O M_1$ время $l/(c-v)$, где l — длина пути $O M_1$, а на обратное прохождение этого же отрезка — время $l/(c+v)$. Следовательно, полное время T_1 , затраченное лучом L_1 на путь $O M_1 O$,

$$T_1 = l/(c-v) + l/(c+v) = 2cl/(c^2 - v^2). \quad (1)$$



Чтобы вычислить время T_2 , затраченное лучом L_2 на прохождение пути $O M_2 O$, рассмотрим равнобедренный треугольник $O'M_2O''$, в котором $O M_2 = l$. Очевидно, что, с одной стороны, $O'O'' = vT_2$, а с другой — $O'M_2 = cT_2/2$. Следовательно, по теореме Пифагора

$$c^2 T_2^2 / 4 = l^2 + v^2 T_2^2 / 4,$$

откуда

$$T_2 = 2l/\sqrt{c^2 - v^2}. \quad (2)$$

Сравнивая формулы (1) и (2), находим, что

$$T_1/T_2 = c/\sqrt{c^2 - v^2} = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} = 1/k. \quad (3)$$

Стало быть, $kT_1 = T_2$.

10. Ниже автор излагает свою версию развития релятивистских идей в физике. При этом он не всегда точен. Не упоминая многих из тех, кто способствовал развитию релятивистских идей, он представляет теорию относительности как плод научного творчества всего лишь двух авторов — Лоренца и Эйнштейна. Но даже в такой крайне упрощенной схеме он часто смещает акценты. В частности, по поводу излагаемой в данном параграфе работы Лоренца советую прочесть: Природа, 1985, № 8, с. 117.

По правде сказать, такого рода упрощений и неточностей

здесь не так уж мало. Но книга Р. Утиямы все-таки не учебник и не монография по истории физики, поэтому я не счел нужным обременять читателей обилием оговорок и примечаний — это затруднило бы чтение. Только в самых необходимых, по моему мнению, случаях я отсылаю читателей к источникам, где тот или иной вопрос изложен полнее и точнее или высказывается иная точка зрения.

11. За четыре года до Лоренца такие же преобразования нашел (1900) Лармор. Еще в 1877 г. формулы этих преобразований установил Фохт, исходивший в своем исследовании из механистической теории эфира. См.: Паули В. Теория относительности. М., Наука, 1983; Борн М. Эйнштейновская теория относительности. М., Мир, 1972.

12. По поводу вклада Пуанкаре и Минковского в разработку представления о едином четырехмерном многообразии — пространстве-времени — см.: Паули В. Теория относительности. М., Наука, 1983; Логунов А. А. К работам Анри Пуанкаре о динамике электрона. М., ИЯИ АН СССР, 1984.

13. Относительно оценки вклада Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна и Минковского в создание частной теории относительности см.: Гинзбург В. Л. О теории относительности. М., Наука, 1979; Логунов А. А. К работам Анри Пуанкаре о динамике электрона. М., ИЯИ АН СССР, 1984.

14. При доказательстве неравенства $l_0 > l$ автор апеллирует к зрительному восприятию читателем рис. 9. Но наше зрительное восприятие воспитано на евклидовой метрике. Таким образом, здесь применен, в сущности, «запрещенный прием»: ведь реальное пространство-время псевдоевклидово, а опыт зрительного псевдоевклидового пространства у нас отсутствует. Иначе говоря, мы имеем здесь пример мнимого объяснения (см. предисловие автора к данной книге). Действительно, в привычном для нас евклидовом пространстве по теореме Пифагора (см. рис. 9)

$$l_0^2 = (A_5B_3)^2 = (OA_5)^2 + (OB_3)^2, \quad (1)$$

а в псевдоевклидовой метрике

$$l_0^2 = (OA_5)^2 - (OB_3)^2, \quad (2)$$

И на первый взгляд совсем не очевидно, действительно ли корень из стоящей в (2) справа разности квадратов больше длины отрезка $AB=l$. Но несложный подсчет, доступный пониманию школьниками старших классов, показывает, что это так (при $v < c$).

Из чертежа на рис. 9 очевидно, что

$$OA_5 = OS_5 + S_5A_5 = ct_3 + ct_5 = c(t_3 + t_5) \quad (3)$$

$$OB_3 = c(t_5 - t_3). \quad (4)$$

Подставляя результаты (3) и (4) в формулу (2), получаем

$$l_0^2 = c^2 (t_5 + t_3)^2 - c^2 (t_5 - t_3)^2 = 4c^2 t_3 t_5. \quad (5)$$

Но

$$l/2 = BS = BN_1 + N_1S = vt_3 + ct_3 = (v + c)t_3,$$

откуда

$$t_3 = l/2(c - v). \quad (6)$$

Аналогично

$$l/2 = N_2S - AN_2 = ct_5 - vt_5 = (c - v)t_5,$$

откуда

$$t_5 = l/2(c + v). \quad (7)$$

Подставив выражения (6) и (7) в (5), находим, что

$$l_0^2 = l^2 c^2 / (c^2 - v^2),$$

откуда

$$l = kl_0 = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (8)$$

где k — коэффициент сжатия, графически изображенный на рис. 5.

15. По-немецки *ein spezieller Fall*, по-английски *a special case*. Иногда, заменяя перевод транслитерацией, по-русски говорят: специальная теория относительности.

16. Если согласно Ньютону рассматривать свет как поток корпускул, то и в ньютоновой теории получится, что луч света отклоняется Солнцем. При этом оказывается, что рассчитанное по ньютоновой теории значение отклонения светового луча вдвое меньше значения, вытекающего из теории относительности (см., например: Г и н з б у р г В. Л. О теории относительности. М., Наука, 1979). Кроме общей теории относительности (ОТО), предложено несколько неэйнштейновских релятивистских теорий гравитации. Обсуждаемый в книге Р. Утиямы опыт с отклонением света вблизи Солнца, отвергая ньютонову теорию, согласуется не только с ОТО, но и с ее релятивистскими «конкурентами». Вопросы сравнения теории с экспериментом подробно проанализированы в кн.: У и л л К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. М., Энергоатомиздат, 1985.

17. В разработке этого варианта теории участвовал (1913—1914) математик М. Гроссман, студенческий друг Эйнштейна. См.: В и з г и н В. П. Релятивистская теория тяготения. М., Наука, 1981.

18. Любопытно, что в теории Эйнштейна—Гроссмана был даже специальный термин «приспособленные преобразования» и вводились условия «приспособленности». См. вышеназванную книгу В. П. Визгина.

19. В том же 1915 г. одновременно с работой Эйнштейна

была опубликована статья известного немецкого математика Гильберта, в которой правильные уравнения гравитационного поля получены вариационным методом (перевод статьи Гильберта на русский язык см.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М., Мир, 1979). О взаимоотношениях Гильберта и Эйнштейна в период создания общей теории относительности, в частности о посещении Эйнштейном Гильберта в Гёттингене в первой половине лета 1915 г., во время которого состоялось плодотворное обсуждение работы Эйнштейна, можно узнать, например, из уже называвшейся выше книги В. П. Визгина. В этой книге содержится также анализ интенсивного обмена письмами между Эйнштейном и Гильбертом в ноябре 1915 г.

20. Сам Эйнштейн писал по этому поводу: «Опыт никогда не скажет теории «да», но говорит в лучшем случае «может быть», большей же частью — просто «нет». Когда опыт согласуется с теорией, для нее это означает «может быть»; когда же он противоречит ей, объявляется приговор: «нет».

21. По поводу ситуации с черными дырами см.: Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике. М., Наука, 1985; Новиков И. Д. Энергетика черных дыр. М., Знание, 1986.

22. Для простоты автор отвлекается от поляризации тел.

23. Развитие единых геометризованных теорий гравитационного и электромагнитного полей подробно освещено в монографии: Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века. М., Наука, 1985.

24. We il H. Raum, Zeit, Materie. В. 1918. Полную библиографию трудов Вейля, включая переводы на русский язык, см.: Вейль Герман. Избранные труды. Математика. Теоретическая физика. М., Наука, 1984.

25. Задача построения единой теории поля была поставлена учителем Вейля Гильбертом, который в 1915 г. дал первый конкретный вариант такой теории. См.: Визгин В. П. Релятивистская теория тяготения. М., Наука, 1981.

26. Журнал «В мире науки» (1985, № 5, с. 26) опубликовал статью Питера ван Ньювенхойзена, в которой описано современное развитие идей Калуцы. См. также: Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века. М., Наука, 1985.

27. Первое из таких явлений — фотоэффект — обнаружено в 1877 г. немецким физиком Герцем и экспериментально исследовано.

28. Среди имевших хождение умозрительных моделей атома Резерфорд остановился на планетарной потому, что только она могла объяснить результаты опытов Резерфорда и его сотрудников по рассеянию альфа-частиц. Название «гипотеза Нагаока—Резерфорда», насколько нам известно, употребляют лишь в Японии.

29. Это радиус нуклона. Электрон вплоть до настоящего времени все еще считается точечной частицей, не имеющей размера.

30. Поскольку существует химический элемент под названием «бор», среди физиков ходит каламбур: «Атом Бора — это не атом бора, а атом водорода».

31. Здесь дан вольный перевод японского идиоматического выражения, означающего соединение несовместимого.

32. Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля получено в 1927 г. (после создания квантовой механики) в опытах американских физиков Дэвиссона и Джермера, установивших, что электроны дифрагируют на кристалле как волны с длиной волны, определяемой соотношением де Бройля.

33. Математическую эквивалентность гейзенберговской и шредингеровской формулировок квантовой механики впервые установил сам Шредингер. См.: Физический энциклопедический словарь, т. 2, с 317 (М., Советская энциклопедия, 1962).

34. Физикам того времени было известно еще взаимодействие между магнитными моментами нейтронов и протонов, которое гораздо сильнее гравитационного взаимодействия этих частиц; однако магнитными силами тоже нельзя объяснить связь нуклонов в ядре.

35. Рассмотренный здесь механизм возникновения ядерных сил (бета-силы) впервые правильно оценил советский физик-теоретик И. Е. Тамм, разъяснивший недостатки конкретной схемы взаимодействия нуклонов, предложенной Ферми. Таммовский анализ теории бета-сил вдохновил Юкаву, который в своей основной работе о мезоне и ядерных силах ссылается на статью Тамма.

36. В теории Юкавы разночтений не было, она давала весьма определенное, ясное указание, «запутались» же экспериментаторы: они сначала ошибочно отождествили с мезоном Юкавы мюон, значение массы которого случайно оказалось близким к значению массы «частицы Юкавы» — пиона. С историей «двух мезонов» читатель может ознакомиться, например, по кн.: О г а в а С., С а в а д а С., Н а к а г а в а М. Составные модели элементарных частиц. М., Мир, 1983.

37. Автор имеет в виду, по-видимому, работы А. И. Алиханова и А. И. Алиханьяна (1948), в которых был сделан вывод о наличии в космическом излучении так называемых «варитронов» с разнообразными значениями масс — от 100 до 20 000 электронных масс. Оценка этих работ советскими физиками содержится, например, в кн.: Д о р м а н И. В. Космические лучи. М., Наука, 1981, с. 161.

38. Мезоны строятся из пар «кварк — антикварк». О том, как создавалась кварковая модель, читатель может более подробно узнать из кн.: Н а м б у Е. Кварки. М., Мир, 1984.

39. Вот эти термины в том порядке, как они встречаются в тексте Р. Утиямы: charm — очарованный кварк, квантовое число «очарование»; strangeness — странный кварк, квантовое число «странность»; top — топ-кварк, t-кварк, вольный перевод «высшая ступень»; «седьмое небо» (в смысле высшей степени блаженства); bottom — боттом-кварк, b-кварк, вольный перевод «дно» (моря, озера), «пучина» (как символ неограниченного погружения в глубину); up — u-кварк, вольный перевод «вверх» (имеется в виду одна из двух возможных проекций изоспина — вверх); down — d-кварк, вольный перевод «вниз» (имеется в виду вторая из возможных проекций изотопического спина — вниз).

40. Ядерными силами обусловлены многочисленные явления астрономического масштаба. Простейший пример: диаметр звезды остается неизменным только благодаря давлению, которое поддерживается за счет идущих в ее недрах ядерных реакций. Упомянувшийся автором взрывы сверхновых, космические лучи и т. п. — все это проявления в космических масштабах ядерных сил. Особенно велика была роль этих сил на начальных стадиях эволюции Вселенной. Рекомендуемая литература по теме: В а й н б е р г С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М., Энергия, 1982; Н а м б у Е. Кварки. М., Мир, 1984; Г и н з б у р г В. Л. О физике и астрофизике. М., Наука, 1985.

Космические проявления электромагнитных сил тоже очень разнообразны.

41. Надо ясно отдавать себе отчет, что истолкование сил упругости как чисто электромагнитных не приводит к ошибке лишь при полном учете квантовой природы электронов (дуализма волна — частица — см. гл. 5 — и фермиевской статистики электронов). В частности, упоминаемое Р. Утиямой на стр. 146 конфигурационное взаимодействие электронов возникает за счет того, что электроны удовлетворяют принципу Паули, то есть являются фермионами, а не бозонами.

42. От английского слова glue — клей.

43. Далее, см. стр. 152, автор разъясняет, что число фундаментальных взаимодействий равно четырем.

44. Описывая мысленный эксперимент в пространстве Вейля, автор, как и при объяснении других мысленных экспериментов, использует двух наблюдателей. Но в этом эксперименте один из наблюдателей — это «мы», «люди», живущие в пространстве Вейля, а другой — бог, которому Р. Утияма отводит роль не только наблюдателя, но и существа, изменяющего условия эксперимента. Словом, бог Утиямы не более чем «производитель работ» по осуществлению мысленного эксперимента, автором которого является сам Утияма. Любопытно, что когда геометрические идеи иллюстрируются на примерах двухмерных модель-

ных пространств (плоскость и сфера), в качестве «нас», «людей» выступают лишённые объема двухмерные существа, не имеющие представления о третьем измерении, а роль бога отводится на этот раз самому читателю, который видит двухмерное пространство «извне» — из нашего обычного трехмерного пространства.

45. Если l — длина линейки, а Δl — приращение длины, то относительное приращение равно $\Delta l/l$; см. аналогичное определение на стр. 181. Для простоты будем вместо «относительного приращения» говорить «приращение длины».

46. Идея единой теории поля восходит к Ми и Гильберту. См.: Визгин В. П. Релятивистская теория тяготения. М., Наука, 1981.

47. Неудачным оказался рассмотренный Р. Утиямой вариант теории Вейля, опубликованный в 1918 г. в кн.: Weill H. Raum, Zeit, Materie. Но после создания дираковской теории электрона Вейль видоизменил свою первоначальную идею. В 1929 г. он написал статью «Электрон и гравитация» (ее перевод на русский язык см. в кн.: Вейль Герман. Избранные труды. М., Наука, 1984), в которой указал, что калибровочная инвариантность (симметрия) должна относиться не к свойствам пространства-времени (как ошибочно думал сам Вейль в 1918 г.), а к свойствам элементарных частиц и дал следующую формулировку принципа калибровочной инвариантности для квантовой электродинамики: «Уравнения не меняются, если одновременно заменить

$$\psi \text{ на } e^{i\lambda} \psi \text{ и } A_\mu \text{ на } A_\mu + 1/e \cdot d\lambda/dx'_\mu,$$

где λ — некоторая произвольная функция точки четырехмерного мира», ψ — волновая функция электрона, A_μ — электромагнитный потенциал. Эта формулировка настолько безупречна и окончательна, что без всяких изменений вошла в современные учебники теории поля (см., например: Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. М., Наука, 1981; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М., Наука, 1984). Именно этим блестящим успехом объясняется, почему введенные Вейлем термины «калибровка», «калибровочная симметрия», «калибровочные поля» ныне общеприняты в теоретической физике. Таким образом, теория Вейля не окончилась конфузом: он сам исправил свою ошибку и нашел верную интерпретацию, которая спасла его идею и открыла путь для последующего развития теории калибровочных полей. Краткий очерк этого развития содержится в комментарии А. Н. Паршина к указанной статье Вейля. О самой теории Вейля можно прочитать также в кн.: Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века.

48. На необходимость перехода от длин линеек (описывающих свойства пространства-времени, геометрия которого в основном обусловлена гравитационным полем) к волновым функциям частиц вещества (в данном случае к электронным волнам) указал Вейль в статье «Электрон и гравитация» (см. примечание 47), в которой он в следующих словах сформулировал «принцип калибровочной инвариантности»: «Электромагнитное поле является необходимым сопутствующим явлением не гравитационного поля, а волнового поля частиц вещества, представляемого волновой функцией частицы ψ ».

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ааронов 185

Алиханов А. И. (214)*

Алиханьян А. И. (214)

Ахиезер А. И. (216)

Березинский В. С. (200)

Берестецкий В. Б. (216)

Боголюбов А. И. (209)

Боголюбов Н. Н. (216)

Болотовский Б. М. (209)

Бом Д. 185

Бор Н. 121

Борн М. (211)

Вавилов С. И. (209)

Вайнберг С. 195, 196, 197, 198, 207, (215)

Вейль Г. 99, 101, 102, 103, 160, 161, 168, 169, 173,
174, 175, 177, 183, (213), (216), (217)

Визгин В. П. (212), (213), (216)

Вин В. 116

Волошин М. Б. (200)

Галилей Г. 36, 46, 63

Гейзенберг В. 100, 128, 129

Гелл-Манн М. 141, 143

Гильберт Д. (213), (216)

Гинзбург В. Л. (211), (212), (213), (215)

Герц Г. (213)

Глэшоу Ш. 195, 196, 198, 207

Гримальди Ф. (21)

* Скобки означают, что эта часть указателя составлена по тексту примечаний и комментариев переводчика. — *Ред.*

Гроссман М. (212)
Гук Р. 20, 21, 23, (209)
Гюйгенс Х. 20, 21, 23

Де Бройль Л. 122, (214)
Джермер Л. (214)
Джинс Дж. 116
Дирак П. 128, 129
Дорман И. В. (214)
Дэвиссон К. (214)

Евклид 28

Иваненко Д. Д. (200)

Калуца Т. 103, 104, 107, (213)
Камаэ 200
Клейн О. 103, 106, 107
Кобаяси 203
Кобзарев И. Ю. (209)
Колумб Х. (207)

Лармор Дж. (211)
Ли Т. 204
Логунов А. А. (211)
Лоренц Х. 41, 43, 44, 47, (209), (210), (211)

Майкельсон А. 23, 38, 41, 42, 45, (210)
Максвелл Дж. 30, 32
Ми Г. 216
Миллс Р. 178, 206

Минковский Г. (211)

Морли Э. 23, 38

Нагаока Х. 119, (213)

Накагава М. (214)

Намбу Ё. (214), (215)

Новиков И. Д. (213)

Ньювенхойзен П. ван (213)

Ньютон И. 18, 20, (209), (212)

Огава С. (214)

Паршин А. Н. (216)

Паули В. 129, 133, 134, (211), (215)

Пифагор (210), (211)

Пуанкаре А. (211)

Резерфорд Э. 119, (213)

Риман Б. 100, 161, 174

Рэлей 116

Савада С. (214)

Салам А. 195, 196, 198, 207

Судзуки 200

Тамм И. Е. (214)

Танигава 136

Танамура С. 185

Тер-Мартиросян К. А. 200

Томонага С. 207

Уилл К (212)

Утияма Р. 195, 203, (209), (210), (215), (216)

Ферми Э. 132, 134, (214)

Фицджеральд Дж. (209)

Фохт В. (211)

Хевисайд О. (209)

Цвейг Дж. 141, 143

Ширков Д. В. (216)

Шредингер Э. 128, (214)

Эйнштейн А. 18, 35, 45, 46, 47, 48, 49, 54, 55, 61,
66, 67, 68, 69, 74, 77, 83, 89, 91, 92, 98, 99, 103,
106, 107, 108, 109, 110, 112, 117, 122, 161, (210),
(212), (213)

Этвеш Р. 16, 63, 70

Юкава Х. 130, 135, 136, 207, (214)

Янг Ч. 178, 203, 204, 205, 206

ОГЛАВЛЕНИЕ

Академик В. Л. Гинзбург. Предисловие	5
Предисловие автора	8
Глава 1. О ПОНЯТИИ ПОЛЯ	
Силы и закон инерции	11
Второй закон механики	15
Тяжелая и инертная масса	16
Дальнодействие и близкодействие	18
Эфир	20
Опыт Майкельсона — Морли	23
Электрическое поле	25
Пространство	28
Электромагнитное поле и свет	30
Глава 2. ЧАСТНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	
Принцип относительности Галилея	34
Абсолютная система отсчета	37
Опыта Майкельсона—Морли	38
Гипотеза Лоренца о сокращении масштабов	41
Частный принцип относительности Эйнштейна	45
Принцип постоянства скорости света	46
Пространство-время	49
Преобразование Лоренца	55
Об энергии	58
Глава 3. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	
Границы применимости частной теории относительности	61
Общий принцип относительности и принцип эквивалентности	66
Опыт с лифтом	69
Околоземное пространство	75
О кривизне пространства	78
Сила тяжести и кривизна пространства	81
Истинные и фиктивные гравитационные поля	84
Законы гравитации	87
Экспериментальная проверка	91
Глава 4. ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ	
Сходство гравитационного и электромагнитного полей	96
Расширение эйнштейновского пространства-времени	100
Теории с пятью измерениями	103
Упадок единых теорий поля	107
Глава 5. РАСЦВЕТ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ	
Проблема теплового излучения	112
Гипотеза квантов и фотоны	116

Строение атомов	118
Модель атома, предложенная Нильсом Бором	121
Рождение квантовой механики	124
Глава 6. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	
Ядерные силы	130
Теория Юкавы	135
Классификация элементарных частиц	140
Теория кварков	140
Глава 7. ЧЕТЫРЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
Какие бывают силы?	144
Классификация сил	148
Глава 8. КАЛИБРОВОЧНАЯ ТЕОРИЯ ВЕЙЛЯ	
Потенциал	153
Сравнение длин	158
Пространство Вейля	161
Параллельный перенос стрелок	163
Калибровочное поле	167
Единая теория поля Вейля	174
Глава 9. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ	
Роль электромагнитного поля	178
Информационные поля	185
Обобщенные калибровочные поля	188
Практическое применение теории калибровочных полей	195
Глава 10. ГОРЬКИЕ СОЖАЛЕНИЯ	201
Примечания и комментарии переводчика	209
Именной указатель	218

Рёю УТИЯМА

К ЧЕМУ ПРИШЛА ФИЗИКА?

(От теории относительности
к теории калибровочных полей)

Главный отраслевой редактор *Демьянов В. П.*

Редактор *Яснопольский Н. Ф.*

Мл. редактор *Терехина Н. П.*

Худож. редактор *Егорова Т. С.*

Художественное оформление *Пантелеева В. И.*

Техн. редактор *Красавина А. М.*

Корректор *Мелешкина Н. Д.*

ИБ № 7063

Сдано в набор 10.01.86. Подписано к печати 31.07.86.
Формат бумаги 70×100¹/₃₂. Бумага тип. № 1. Гарнитура
литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,03. Усл.
кр.-отт. 18,38. Уч.-изд. л. 9,33. Тираж 93 000 экз. Заказ
2810. Цена 50 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП,
Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 867715.
Ордена Трудового Красного Знамени Калининский поли-
графический комбинат Союзполиграфпрома при Государ-
ственном комитете СССР по делам издательств, полигра-
фии и книжной торговли. 170024, г. Калинин, пр. Ленина, 5.

Рёю Утияма

Родился в 1916 г. в префектуре Сидзуока в Японии. В 1940 г. окончил физический факультет Осакского университета. В настоящее время ректор университета Тэцукаяма, почетный профессор Осакского университета. Один из классиков современной калибровочной теории, статья которого „Инвариантная теоретическая интерпретация взаимодействий“, опубликованная в 1956 г. в журнале „Физикл ревью“, высоко оценивается как предвестница современных теорий объединения взаимодействий. С 1963 по 1974 г. постоянный член международной комиссии по общей теории относительности и гравитации. Автор книг „Общая теория относительности“, „Введение в теорию относительности“ и др.

