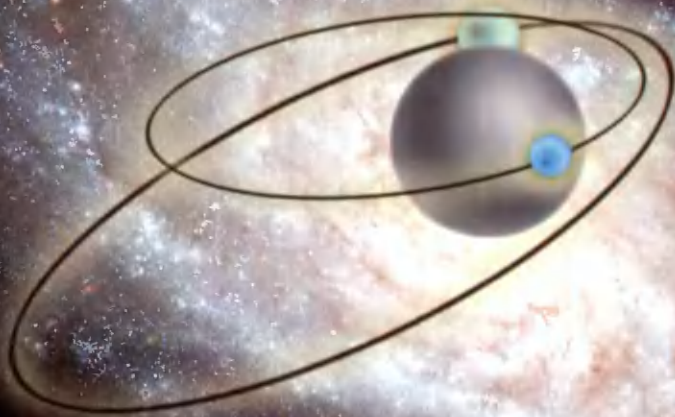


Р. Фейнман

ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ: ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ



БИНОМ

SIX EASY PIECES

*Essentials of Physics
Explained by Its Most
Brilliant Teacher*

RICHARD P.
FEYNMAN

*Originally prepared for publication by
Robert B. Leighton and Matthew Sands*

New Introduction by Paul Davies



Helix Books

PERSEUS BOOKS

Reading, Massachusetts

SIX NOT-SO-EASY PIECES

*Einstein's
Relativity, Symmetry
and Space-Time*

RICHARD P.
FEYNMAN

*Originally prepared for publication by
Robert B. Leighton and Matthew Sands*

New Introduction by Roger Penrose



Helix Books



Addison-Wesley

Reading, Massachusetts

Р. Фейнман

ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ: ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ

Перевод с английского
Е. В. Фалёва и В. А. Носенко



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2006

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Перевод: ч. I — Е. В. Фалёв, ч. II — В. А. Носенко

Фейнман Р.

Ф36 Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее / Р. Фейнман; пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006 — 318 с.: ил.
ISBN 5-94774-337-X

Приводятся избранные лекции выдающегося американского физика, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана. В них рассматриваются этапы становления современной физики и ее концепций, связь физики с другими науками, теория тяготения, квантовая механика, симметрия законов физики, специальная теория относительности, искривленное пространство-время и другие важные вопросы, разработанные автором в процессе его плодотворной научной деятельности.

Для студентов, изучающих теоретическую и экспериментальную физику, преподавателей вузов и широкого круга читателей, интересующихся проблемами современной физики.

УДК 53
ББК 22.3

По вопросам приобретения обращаться:

«БИНОМ. Лаборатория знаний» (095) 157-19-02, e-mail: Lbz@aha.ru

<http://www.Lbz.ru>

Оригинальные издания:

1. SIX EASY PIECES: ESSENTIALS OF PHYSICS EXPLAINED BY ITS MOST BRILLIANT TEACHER by RICHARD P. FEYNMAN.
2. SIX NOT-SO-EASY PIECES by RICHARD P. FEYNMAN.

Публикуется с разрешения издательства PERSEUS PUBLISHING, A SUBSIDIARY OF PERSEUS BOOKS L.L.C. (США) и Агентства Александра Корженевского (Россия)

1. ISBN 0-201-40825-2 (англ.)
2. ISBN 0-201-32842-9 (англ.)
ISBN 5-94774-337-X (рус.)

1. Copyright © 1995, 1989, 1963 by the California Institute of Technology
2. Copyright © 1963, 1989, 1997 by the California Institute of Technology
© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006

Оглавление

1. Шесть простых фрагментов

От издателя	11
Введение	12
Специальное предисловие	22
Предисловие автора.	27
1. Атомы в движении.	33
Введение	33
Вещество состоит из атомов	36
Атомные процессы	42
Химические реакции.	46
2. Основы физики.	53
Введение	53
Физика до 1920 года	56
Квантовая физика.	62
Ядра и частицы.	67
3. Отношение физики к другим наукам	75
Введение	75
Химия.	75
Биология	77
Астрономия	86
Геология	88
Психология	90
С чего все началось?	91
4. Сохранение энергии	95
Что такое энергия?	95
Потенциальная энергия тяготения	98
Кинетическая энергия	105
Другие формы энергии.	107

5. Теория тяготения	113
Движение планет	113
Законы Кеплера	114
Развитие динамики	116
Ньютоновский закон тяготения	117
Всемирное тяготение	122
Эксперимент Кавендиша	128
Что такое тяготение?	130
Тяготение и относительность	134
6. Квантовое поведение	137
Атомная механика	137
Эксперимент с пулеметной стрельбой	139
Эксперимент с волнами	141
Эксперимент с электронами	144
Интерференция электронных волн	146
Наблюдение за электронами	149
Исходные принципы квантовой механики	155
Принцип неопределенности	157

II. Шесть не столь простых фрагментов

От издателя	163
Введение	164
1. Векторы	173
1.1. Симметрия в физике	173
1.2. Переносы начала координат	174
1.3. Вращения	177
1.4. Векторы	181
1.5. Векторная алгебра	184
1.6. Законы Ньютона в векторной записи	187
1.7. Скалярное произведение векторов	190
2. Симметрия законов физики	195
2.1. Операции симметрии	195
2.2. Симметрия в пространстве и времени	196
2.3. Симметрия и законы сохранения	200
2.4. Зеркальные отражения	201
2.5. Полярный и аксиальный векторы	206
2.6. Какая же рука — правая?	209
2.7. Четность не сохраняется!	210
2.8. Антивещество	213
2.9. Нарушенная симметрия	216

3. Специальная теория относительности	219
3.1. Принцип относительности	219
3.2. Преобразование Лоренца	222
3.3. Опыт Майкельсона—Морли	224
3.4. Преобразование времени	228
3.5. Лоренцево сокращение	232
3.6. Одновременность	232
3.7. 4-векторы	234
3.8. Релятивистская динамика	235
3.9. Связь массы и энергии	237
4. Релятивистская энергия и релятивистский импульс	241
4.1. Относительность и философы	241
4.2. Парадокс близнецов	245
4.3. Преобразование скоростей	246
4.4. Релятивистская масса	251
4.5. Релятивистская энергия	255
5. Пространство-время	261
5.1. Геометрия пространства-времени	261
5.2. Пространственно-временные интервалы	265
5.3. Прошедшее, настоящее и будущее	267
5.4. Еще немного о 4-векторах	270
5.5. Алгебра 4-векторов	274
6. Искривленное пространство	279
6.1. Искривленное пространство двух измерений	279
6.2. Кривизна в трехмерном пространстве	290
6.3. Наше пространство искривлено	292
6.4. Геометрия в пространстве-времени	295
6.5. Сила притяжения и принцип эквивалентности	296
6.6. Ход часов в поле сил тяготения	297
6.7. Кривизна пространства-времени	303
6.8. Движение в искривленном пространстве-времени	304
6.9. Эйнштейновская теория тяготения	308
О Ричарде Фейнмане	311
Предметный указатель	313

I

Шесть простых фрагментов



От издателя^{*}

Книга «Шесть простых фрагментов» выросла из потребности сделать доступным для как можно более широкой аудитории некий базовый учебник по физике, который содержит необходимые и в то же время не слишком специальные технические знания и основывается на научных достижениях Ричарда Фейнмана. Мы выбрали шесть наиболее простых глав из знаменитой и исторически важной книги «Лекции по физике» (впервые опубликованной в 1963 г.), которая остается самой известной из публикаций этого ученого. Широкие круги читателей могут воспользоваться тем, что Фейнман решил представить определенные ключевые вопросы физики почти исключительно в качественных понятиях, без использования формальной математики, и эти вопросы собраны в «Шести простых фрагментах».

Издательство Эддисон-Уэсли хотело бы выразить благодарность Полю Дэвису за его проникновенное введение к этому новому сборнику. Следуя этому введению, мы решили воспроизвести два предисловия из «Лекций по физике», одно из них — принадлежащее самому Фейнману, и другое — двум его коллегам, так как они создают контекст для последующих фрагментов и помогают понять как самого Фейнмана, так и его научные достижения.

И наконец, мы хотели бы поблагодарить физический факультет Калифорнийского технологического института и архив института, в особенности д-ра Джудит Гудстейн и д-ра Брайана Хэтфилда за их замечательные советы и рекомендации, очень помогавшие нам на протяжении всей работы над этим проектом.

* На языке оригинала книга была опубликована издательством Addison-Wesley. — *Прим. перев.*

Введение

Существует распространенное заблуждение, что наука — совершенно безличное, бесстрастное и полностью объективное занятие. В то время как большая часть прочих видов человеческой деятельности находится во власти моды, преходящих увлечений и особенностей личностей, науку считают подчиненной принятым точным методам и тщательной проверке. Имеют значение только результаты, но не люди, которые их получают.

Это, конечно, явная бессмыслица. Наука делается людьми, как и любое другое человеческое начинание, и также подвержена влиянию моды и личного вкуса. Правда, моду здесь устанавливает не выбор предмета обсуждения, а способ, каким ученые мыслят о мире. Каждый век вырабатывает свой собственный подход к научным проблемам, обычно следуя примеру некоторых ярких личностей, которые и ставят главные вопросы, и определяют наилучшие способы их решения. Случается, что ученый достигает достаточного положения в обществе и становится известен широкой публике, и если при этом он действительно обладает выдающимися способностями, то может стать образцом для подражания во всем научном сообществе. В прежние века таким образцом был Исаак Ньютон. Ньютон олицетворял ученого-джентльмена — с большими связями в высшем свете, глубоко религиозного, неторопливого и методичного в своей работе. Его стиль научной работы оставался образцом на протяжении двух столетий. В первой половине XX века Альберт Эйнштейн заменил Ньютона в роли популярного образа ученого. Эксцентричный, растрепанный, родом из Германии, рассеянный, полностью погруженный в свою работу, и при этом идеальный абстрактный мыслитель, Эйнштейн изменил прежний подход к физике, поставив вопрос о самих понятиях, определяющих ее как предмет.

Ричард Фейнман стал образцом для подражания в физике второй половины XX столетия — первым американцем, достигшим такого статуса. Родившийся в Нью-Йорке в 1918 г. и получивший образование на Восточном побережье, он опоздал для того, чтобы принять участие в Золотом Веке физики, который в первые три десятилетия этого века изменил наше видение мира в ходе двойной революции, ознаменовавшейся открытием теории относительности и квантовой механики. Эти стремительные прорывы заложили основание той системы взглядов, которую мы ныне называем Новой Физикой. Фейнман отталкивался от этих уже заложенных основ и участвовал в возведении «первого этажа» Новой Физики. Его вклад касался почти каждого ее аспекта и оказал существенное влияние на характер видения мира.

Фейнман был физиком-теоретиком по преимуществу. Ньютон был экспериментатором и теоретиком в равной мере. Эйнштейн просто-напросто пренебрегал экспериментом, предпочитая опираться на чистую мысль. Фейнману довелось развить глубоко теоретическое понимание природы, но он всегда оставался в тесной связи с реальным и часто неприглядным миром экспериментальных результатов. Никто из тех, кто видел, как Фейнман выяснил причину катастрофы космического челнока Челленджер, погрузив эластичную ленту в ледяную воду, не мог бы сомневаться в том, что имеет дело со специалистом по зрелищам и одновременно весьма практичным мыслителем.

Первоначально Фейнман сделал себе имя работой над теорией субатомных частиц, а именно в области так называемой квантовой электродинамики, или КЭД, с которой фактически начиналась квантовая теория. В 1900 г. немецкий физик Макс Планк предположил, что свет и прочее электромагнитное излучение, которое до того рассматривалось как волны, парадоксальным образом ведет себя при взаимодействии с веществом подобно миниатюрным сгусткам энергии, или «квантам». Именно эти кванты стали впоследствии называть фотонами. К началу 1930-х гг. архитекторы новой квантовой механики разработали математическую схему, способную описать эмиссию и поглощение фотонов электрически заряженными частицами, такими как электроны. Хотя эта ранняя версия КЭД достигла некоторых успехов, данная теория имела явные изъяны. Во многих случаях вычисления давали абсурдные и даже бесконечные ответы на хорошо поставленные физические вопросы.

Именно к проблеме построения непротиворечивой теории КЭД и обратился молодой Фейнман в конце 40-х гг.

Чтобы поставить КЭД на верную основу, было необходимо устранить противоречия этой теории не только с принципами квантовой механики, но также и специальной теории относительности. Для каждой из этих двух теорий были разработаны свои математические аппараты, сложные системы уравнений, которые следовало совместить, чтобы получить удовлетворительное описание КЭД. Современники Фейнмана пытались решить эту проблему. Однако взяться за эту задачу было под силу далеко не каждому, для этого требовалась высокая степень математического искусства. Сам Фейнман избрал радикальный путь — настолько отличный от большинства, что это позволило ему записать ответы непосредственно, без использования какой бы то ни было математики!

В помощь героическому порыву своей интуиции Фейнман изобрел простую систему диаграмм, получивших его имя. Диаграммы Фейнмана — символический и чрезвычайно эвристический способ представления того, что происходит, когда электроны, протоны и другие частицы взаимодействуют между собой. Сегодня эти диаграммы — не более чем рядовое вспомогательное средство для вычислений, но в начале 50-х годов они произвели поразительную перемену в методах построения теоретической физики.

Частная проблема построения непротиворечивой теории квантовой электродинамики, хотя она и была вехой в развитии физики, была только началом. С нее начал свою историю особый фейнмановский стиль, тот стиль, которому было предназначено породить целый ряд важных результатов в широком круге физических проблем. Этот стиль можно лучше всего охарактеризовать как сплав уважения и непочтительности по отношению к общепринятым взглядам.

Физика — точная наука, и существующая система знаний, хотя и несовершенная, не может быть просто отброшена в сторону. Фейнман уже в раннем возрасте обрел чрезвычайно глубокое понимание принятых в физике принципов, и посвятил свои усилия почти исключительно конвенциональным проблемам. Он не был из тех гениев, которые корпят в одиночестве в тихой заводи своей дисциплины и наталкиваются на нечто в корне новое. Особенностью его дара была способность подойти к ключевым проблемам неким весьма своеобразным способом. Это озна-

чало сторониться существующего формализма и развивать свой собственный глубоко интуитивный подход. В то время как большинство физиков-теоретиков полагаются на тщательные математические вычисления, чтобы получить проводника и опору в незнакомой местности, манера Фейнмана была весьма бесцеремонной. Создавалось впечатление, что он мог читать природу, словно открытую книгу, и просто сообщал, что он обнаружил, обходясь без скучного научного анализа.

Действительно, следуя своему стилю, Фейнман выказывал здоровое пренебрежение к строгому формализму. Трудно выразить словами глубину гениальности, необходимой для работы подобным образом. Теоретическая физика — одна из самых трудных областей интеллектуальной деятельности, сочетающая абстрактные понятия, не допускающие наглядности, с крайней математической сложностью. Для большинства физиков прогресс становится возможным лишь благодаря принятию высочайших стандартов умственной дисциплины. Фейнман же, казалось, обходился грубо с этим практическим кодексом и словно бы срывал новые результаты как спелые плоды с Дерева Знания.

Стиль Фейнмана происходил во многом из особенностей его личности. Как в своей профессиональной, так и в личной жизни он относился к миру как к чрезвычайно занимательной игре. Физический мир представлял ему в виде удивительного ряда загадок и задач, точно так же как и общественная среда. Неисправимый шутник, он относился к научным авторитетам и к академическому аппарату с той же особой непочтительностью, которую проявлял в отношении щепетильного математического формализма. Никогда не мирясь с глупостью, в каком бы виде он с ней ни встречался, он нарушал правила везде, где находил их ненужными или бессмысленными. Его автобиографические произведения содержат любопытные истории о том, как он перехитрил службу безопасности проекта по созданию атомной бомбы, как он взламывал сейфы, как обезоруживал женщин своим скандально смелым поведением. С той же непринужденностью он отнесся и к своей Нобелевской премии, присужденной ему за его работу над КЭД.

Вдобавок к его неформальности, у Фейнмана был ряд непонятных, но привлекательных причуд. Многие будут помнить его одержимость Тувой — республикой, заброшенной в просторах Центральной Азии, — запечатленную столь замечательно в

документальном фильме, снятом им незадолго до смерти. Среди других его страстей были игра на барабанах бонго*, живопись, посещение стрип-клубов и расшифровка текстов майя.

Фейнман сам многое сделал для того, чтобы развить свою неповторимую личность. Всегда с неохотой обращаясь к перу и бумаге, он был очень говорлив в беседах и любил рассказывать истории о своих идеях и веселых проделках. Эти истории, накапливавшиеся с годами, добавляли ему загадочности, и сделали его легендой еще при жизни. Его увлекательная манера изложения обеспечивала ему любовь студентов, особенно тех, что помоложе, которые буквально молились на него. Когда Фейнман умер от рака в 1988 году, студенты Калифорнийского технологического института, где он работал на протяжении почти всей своей карьеры, развернули транспарант с простой надписью «Мы любим тебя, Дик».

Именно беззаботный подход Фейнмана к жизни вообще и к физике в частности сделали его таким превосходным преподавателем. У него было мало времени для чтения формальных лекций или даже для руководства аспирантами. Тем не менее, он мог читать блестящие лекции, когда это было ему удобно, проявляя во всей полноте свой искрометный юмор, пронизательную интуицию и непочтительность к авторитетам — те же качества, которые он проявлял и в своей исследовательской работе.

В начале 60-х годов Фейнмана убедили прочитать вводный цикл лекций по физике для студентов первого и второго курсов КАЛТЕХ^а**. Он сделал это со своим неповторимым шармом и неподражаемой смесью неформальности, живости и своеобразного юмора. К счастью, эти бесценные лекции были спасены для потомства в виде книги. Хотя по стилю и форме они отстоят далеко от привычных учебников, фейнмановские «Лекции по физике» имели огромный успех и воодушевляли и вдохновляли целое поколение студентов по всему миру. И три десятилетия спустя эти тома не утратили ничего из своего блеска и ясности. «Шесть простых фрагментов» отобраны непосредственно из «Лекций по физике». При составлении этой книги предполагалось дать широкому кругу читателей представление о Фейнмане-наставнике, позаимствовав начальные, лишённые техниче-

* Небольшой сдвоенный барабан. — *Прим. перев.*

** Сокращенное название Калифорнийского технологического института. — *Прим. перев.*

ской терминологии главы из этой исторической работы. В результате получилась восхитительная книга — она служит одновременно и базовым учебником по физике для не-ученых, и учебником по самому Фейнману.

Что больше всего впечатляет в фейнмановском тщательно составленном изложении — так это то искусство, с которым он может развить далеко идущие физические концепции, введя самый минимум понятий, математических формул и технического жаргона. Он обладал профессиональным умением найти именно ту аналогию или пример из повседневной жизни, которые проливали свет на самое существо глубокого принципа, не усложняя его случайными или несущественными подробностями.

Подбор тем в этом томе не имел целью дать полное представление о современной физике, но скорее дать почувствовать дразнящий вкус фейнмановского стиля работы. Скоро мы увидим, как он может осветить по-новому даже привычные понятия, такие как сила и движение. Ключевые понятия иллюстрируются примерами, взятыми из повседневной жизни или из истории. Физика постоянно связывается с другими дисциплинами, в то же время не оставляя у читателя сомнений по поводу того, какая наука является основополагающей.

С самого начала «Шести простых фрагментов» мы узнаем, как вся физика основывается на нашем представлении о законе — о том, что существует упорядоченная вселенная, которую можно понять, используя рациональный подход. Однако законы физики не самоочевидны для нас в нашем непосредственном опыте. Напротив, они скрыты, искусно зашифрованы в тех явлениях, которые мы изучаем. Требуется сокровенное действие физиков — смесь тщательно организованного эксперимента и точного математического расчета — чтобы вскрыть лежащую в основе реальность.

Возможно, наиболее известным законом физики является ньютоновский закон тяготения, где сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Эта тема появляется у Фейнмана в контексте Солнечной системы и кеплеровских законов движения планет. Но тяготение универсально, оно действует во всем космосе, что дает Фейнману возможность украсить свое изложение примерами из астрономии и космологии. Комментируя изображение шаровидного скопления, каким-то образом удерживаемого вместе незримыми силами, он вдруг лирически замечает: «Кто не видит здесь действия сил тяготения, у того нет души!»

Известны другие негравитационные законы, описывающие взаимодействие частиц вещества друг с другом. Есть лишь несколько таких сил, и сам Фейнман принадлежит к числу тех немногих выдающихся ученых в истории, которым удалось открыть новый закон физики, определяющий способ воздействия слабых ядерных сил на некоторые субатомные частицы.

Физика частиц высоких энергий была жемчужиной в короне послевоенной физики, одновременно устрашающей и очаровывающей, со своими огромными ускорителями и кажущимся нескончаемым списком все новых открываемых субатомных частиц. Исследования Фейнмана были направлены главным образом на то, чтобы наполнить смыслом результаты его деятельности. Большой объединяющей темой среди физиков, занимавшихся частицами, была в то время роль законов симметрии и сохранения, наведение порядка в этом субатомном зверинце.

Как это бывает, многие из видов симметрии известных в физике частиц были хорошо знакомы уже в классической физике. Главными среди них являются симметрии, вытекающие из однородности пространства и времени. Возьмем время: если оставить в стороне космологию, в которой большой взрыв отмечает начало времени, в физике нет ничего, что позволяло бы отличить один момент времени от другого. Физики говорят, что мир «инвариантен относительно сдвигов во времени», имея в виду, что для описания физических явлений не имеет никакого значения, возьмете ли вы за точку отсчета времени в своих измерениях момент полудня или полуночи. Физические процессы не зависят от выбора начала времени отсчета. И оказывается, что из этой симметрии временных сдвигов непосредственно вытекает один из основных, и при этом один из самых полезных законов физики — закон сохранения энергии. Этот закон гласит, что вы можете передавать энергию из одного места в другое, можете преобразовывать ее, но вы не можете создать ее или уничтожить. Фейнман с предельной ясностью излагает этот закон, рассказывая увлекательную историю о Денисе-проказнике, который из озорства всегда прятал свои игрушечные кубики от матери (глава 4).

Самая интересная и требующая наибольшего напряжения глава в этом томе — последняя, в которой излагаются основы квантовой физики. Не будет преувеличением сказать, что квантовая механика доминировала в физике XX столетия и превосходила в своей успешности все существующие научные теории.

Она необходима для понимания субатомных частиц, атомов и ядер, молекул и химических связей, структуры твердых тел, сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей, электрической и тепловой проводимости металлов и полупроводников, строения звезд и многого другого. Ее практические применения простираются от лазера до микрочипа. И все это из теории, которая на первый взгляд — и на второй тоже — выглядит абсолютно безумной! Нильс Бор, один из основателей квантовой механики, как-то заметил, что тот, кто не был потрясен этой теорией, тот не понял ее.

Вся проблема заключается в том, что квантовые идеи покушаются на самую сущность того, что мы могли бы назвать реальностью здравого смысла. В частности, ставится под сомнение убежденность в том, что физические объекты, такие как электроны или атомы, обладают правом самостоятельного существования с полным набором физических характеристик. Например, электрон не может иметь положение в пространстве и точно определенную скорость одновременно. Если вы хотите определить, где находится электрон, вы обнаружите его в некотором месте, а если вы измеряете его скорость, то получаете определенный ответ, но невозможно выполнить оба наблюдения одновременно. Бессмысленно приписывать определенные, но при этом неизвестные значения положения в пространстве и скорости электрону в отсутствие завершенного комплекса измерений.

Эта неопределенность в самой природе атомных частиц получила свое выражение в знаменитом принципе неопределенности Гейзенберга, который накладывает строгие границы на точность, с которой такие характеристики, как положение в пространстве и скорость, могут быть известны одновременно. Четко определенное положение в пространстве размывает границы возможных значений скорости, и наоборот. Размытость квантовых объектов проявляется в том, каким образом движутся электроны, протоны и другие частицы. Определенные эксперименты могут показать, что они следуют по определенным траекториям в пространстве, подобно снарядам, выпущенным в цель. Но в других условиях эксперимента может оказаться, что эти сущности могут вести себя и как волны, являя характерные образцы дифракции и интерференции.

Мастерски проведенный Фейнманом анализ знаменитого «эксперимента на двух щелях», который демонстрирует эту невооб-

разимую корпускулярно-волновую двойственность в ее самой яркой форме, стал классикой в истории научного истолкования реальности. Фейнману удалось, используя немногие весьма простые идеи, привести читателя к самой сердцевине квантового таинства, и он оставляет нас ослепленными великолепием парадоксальной природы описываемой здесь реальности.

Хотя квантовая механика вошла в учебники уже в начале 1930-х гг., Фейнман, что для него характерно, уже в молодости предпочел приспособить эту теорию под себя, придав ей совершенно новый облик. Достоинство метода Фейнмана заключается в том, что он дает нам очень живую картину того, как природа совершает свои квантовые фокусы. Он исходит из положения, что путь частицы в пространстве вообще не является четко определенным в квантовой механике. Мы можем вообразить себе произвольно движущийся электрон не просто перемещающимся по прямой линии из пункта А в пункт Б, как это представляется здравому смыслу, а проходящим целый ряд извилистых маршрутов. Фейнман приглашает нас представить, что электрон каким-то образом исследует все возможные пути, и если мы не измеряем, каким именно маршрутом он действительно следует, мы должны предполагать, что все эти взаимоисключающие пути каким-то образом входят в состав реальности. Так что, когда электрон прибывает в некую точку в пространстве — скажем, на экране — части многих различных историй должны сложиться вместе, чтобы произвести это целостное событие.

Предложенный Фейнманом так называемый метод функциональных интегралов по траекториям придал этому удивительному представлению четкую математическую форму. Много лет эта концепция оставалась в большей или меньшей степени диковинкой, но по мере того, как физики продвигались к пределам квантовой механики, — прилагая ее к тяготению и даже к космологии — оказалось, что фейнмановский подход дает наилучшее вычислительное средство для описания квантового мира. Вполне может оказаться, что с точки зрения истории, среди его многих выдающихся достижений в физике именно изложение квантовой механики в форме функциональных интегралов по траекториям было самым значительным.

Многие из идей, обсуждаемых в этой книге, являются глубоко философскими. И при этом Фейнману была свойственна неизменная подозрительность к философам. Я однажды имел слу-

чай поспорить с ним относительно природы математики и физических законов, точнее, можно ли рассматривать абстрактные математические законы как обладающие независимым существованием в платоновском смысле. Он очень живо и наглядно описал, почему это действительно выглядит подобным образом, но сразу же отступил, как только я попытался заставить его занять определенную философскую позицию. Подобную же осторожность он проявлял, когда я пытался разговаривать с ним на тему редукционизма. Бросая взгляд в прошлое, я полагаю, что Фейнман, в принципе, не пренебрегал философскими проблемами. Но, подобно тому как он мог разрабатывать утонченную математическую физику без использования систематической математики, так же он приходил к некоторым тонким философским прозрениям, не имея философской системы. Он испытывал неприязнь лишь к формализму, но не к содержанию проблем.

Маловероятно, что мир увидит еще одного Ричарда Фейнмана. Он был в очень большой степени человеком своего времени. Стил Фейнмана давал хорошие результаты в применении к предмету, который находился в процессе закрепления достижений научной революции и начала далеко идущих исследований ее последствий. Послевоенная физика была прочной в своих основаниях, зрелой в своей теоретической структуре и все же широко открытой для нетривиальных исследовательских решений. Фейнман вступил в чудесную страну абстрактных понятий и запечатлел свое личное своеобразие на многих из них. Эта книга дает уникальную возможность получить некоторое представление о работе мысли выдающегося человека.

Сентябрь 1994

Поль Дэвис

Специальное предисловие

(из «Лекций по физике»)

К концу жизни Ричарда Фейнмана его слава вышла далеко за пределы научного сообщества. Его деятельность в роли члена комиссии по расследованию катастрофы космического челнока Челленджер придала ему широкую известность; аналогичным образом книга-бестселлер о его авантурных приключениях сделала его народным героем, почти в той же степени, что Альберта Эйнштейна. Но и в 1961 году, до того, как Нобелевская премия привлекла к нему внимание широкой публики, Фейнман был более чем только известен среди членов научного сообщества — он был легендарной личностью. Несомненно, его выдающийся дар наставника способствовал распространению и обогащению легенды о Ричарде Фейнмане.

Он был воистину великим преподавателем, возможно, величайшим в свою эпоху и в нашу. Для Фейнмана лекционная аудитория была театром, а лектор — исполнителем роли, который должен не только сообщить факты и сведения, но и произвести впечатление игрой и блеском ума. Он бродил перед аудиторией, размахивая руками, «невероятная смесь физика-теоретика и циркового зазывалы, весь — движение и звук», как писала «Нью-Йорк Таймс». Обращался ли он к аудитории студентов, коллег, или к широкой публике, для всех, кому посчастливилось присутствовать на лекциях Фейнмана, опыт был неожиданным и всегда незабываемым, как и сам этот человек.

Он был мастером высокой драмы, обладая даром приковывать к себе внимание любой аудитории. Много лет назад он вел курс по высшей квантовой механике для большого класса, состоявшего из нескольких выпускников и большей части студентов физического факультета КАЛТЕХ'а. На одной из лекций Фейнман начал объяснять, как представить сложные определенные интегралы с помощью диаграмм: время по этой оси,

пространство — по той, волнистая линия для этой прямой, и т. д. Описав то, что в мире физики называется диаграммой Фейнмана, он повернулся к классу лицом с озорной ухмылкой: «Вот это и называется “ДИАГРАММОЙ”^{*}». Наступила развязка, и зал разразился стихийными аплодисментами.

В течение многих лет после того, как были прочитаны лекции, составившие эту книгу, Фейнман от случая к случаю выступал с лекциями по курсу физики для первокурсников КАЛТЕХ'а. Естественно, его появления должны были держаться в тайне, чтобы в аудитории оставалось хоть какое-то место для зарегистрированных студентов. Темой одной из таких лекций было искривленное пространство-время, и Фейнман был как всегда великолепен. Но незабываемый момент случился в начале лекции. Тогда только что была открыта сверхновая 1987 года, и Фейнман был очень захвачен этим событием. Он сказал: «У Тихо Браге была своя сверхновая, и у Кеплера своя. И с тех пор их не было 400 лет. Но теперь и у меня есть своя». Аудитория застыла в полной тишине, и Фейнман продолжил: «В галактике 10^{11} звезд. Раньше это было *огромным* числом. Но это всего лишь сто миллиардов. Это меньше, чем дефицит национального бюджета! Раньше мы называли такие числа астрономическими. Теперь следовало бы называть их *экономическими*». Слушатели разразились смехом, и Фейнман, овладев вниманием аудитории, приступил к лекции.

Оставляя в стороне его умение произвести эффект на публику, педагогические приемы Фейнмана были просты. Квинтэссенция его преподавательских принципов была обнаружена среди его бумаг в архиве КАЛТЕХ'а, в записке, которую он нацарапал для себя в Бразилии в 1952 г.:

«Во-первых, уясни себе, почему ты хочешь, чтобы студенты узнали об этой теме, и что именно ты хочешь им сообщить, и метод сам выльется из здравого смысла».

То, что для Фейнмана было «здравым смыслом», зачастую оказывалось блестящим приемом, легко схватывающим суть проблемы. Однажды, во время публичной лекции, он пытался объяснить, почему невозможно подтвердить истинность идеи, используя те же данные, на основе которых она возникла. По видимости отклоняясь от темы, Фейнман начал говорить об автомобильных номерах: «Вы знаете, сегодня вечером со мной

* «And this is called *THE* diagram!»

приключилась удивительная вещь: я шел сюда, на лекцию, и проходил через парковку. И вы не поверите, что произошло. Я увидел машину с номером ARW 357. Вы можете себе представить? Из всех миллионов машинных номеров в стране, какова была вероятность того, что сегодня вечером я увижу именно этот номер? Поразительно!» Так при помощи фейнмановского «здорового смысла» был прояснен вопрос, который даже многие ученые не могли понять.

После 35 лет преподавания в КАЛТЕХ'е (с 1952 по 1987) за Фейнманом числилось 34 прочитанных курса. 25 из них были высшими курсами строго для аспирантов, хотя студенты также просили разрешения посещать их (и часто посещали, так как разрешение почти всегда выдавалось). Оставшаяся часть — были вводные курсы для аспирантов. Лишь однажды Фейнман читал курсы именно для студентов и это было знаменательным событием в 1961/1962 и 1962/1963 учебных годах, с кратким повторением в 1964, когда он прочел те самые лекции, которые стали «Фейнмановскими лекциями по физике».

В то время в КАЛТЕХ'е существовало мнение, что студентов первого и второго курсов обязательный курс физики скорее оттолкнет, чем воодушевит. Чтобы исправить это положение, Фейнмана попросили подготовить такой цикл лекций для начинающих студентов — один год для первокурсников и второй год для них же, ставших второкурсниками. Когда он согласился, сразу же было решено, что лекции должны быть записаны для публикации. Никто не мог предположить, насколько сложной окажется эта работа. Подготовка книги к публикации потребовала огромных усилий от его коллег, равно как и от самого Фейнмана, который осуществлял окончательное редактирование каждой главы.

Также нужно было, чтобы кто-то взял на себя работу по организации курса. Эта задача была весьма осложнена тем, что никогда нельзя было заранее знать, о чем именно будет говорить Фейнман, пока он не появится перед аудиторией и не начнет лекцию. Профессора КАЛТЕХ'а, ассистировавшие ему, должны были затем лезть из кожи вон, чтобы уладить формальности вроде подготовки заданий для студентов и т. д.

Зачем Фейнман посвятил более двух лет коренной переработке методики преподавания основ физики? Об этом можно лишь догадываться, но, вероятно, для этого были три основные причины: во-первых, он любил выступать на публике, а это давало

ему бóльшую аудиторию, чем его обычные лекции для аспирантов; во-вторых, он искренне заботился о студентах, и попросту считал обучение первокурсников важным делом; третьей и, возможно, самой главной причиной была важная для него задача изложить физику, как он ее понимал, в такой форме, чтобы она была доступна молодым студентам. Это было его коньком и тем стандартом, которым он мерил, действительно ли им понятен некоторый вопрос. Однажды член факультета КАЛТЕХ'а попросил Фейнмана объяснить, почему частицы со спином $1/2$ подчиняются статистическим правилам Ферми—Дирака. Он измерил аудиторию пристальным взглядом и ответил: «Я подготовлю об этом лекцию для первокурсников». Но через несколько дней он заявил: «Вы знаете, я не могу этого сделать. Я не могу свести это до уровня первокурсников. Значит, мы не понимаем этого по-настоящему».

Этот его дар сводить глубокие идеи к простым, понятным терминам легко прослеживается на протяжении всех «Фейнмановских лекций по физике», но особенно в его трактовке квантовой механики. Специалисты в этой области могут оценить проделанный им труд. Он представил для начинающих студентов свой метод решения функциональных интегралов вдоль траекторий, разработанную им технику, позволившую ему разрешить одну из глубочайших проблем физики. Его собственная работа с использованием решения интегралов вдоль траекторий принесла ему Нобелевскую премию, которую он разделил в 1965 г. с Джулианом Швингером и Син-Итеро Томанагой.

Многие из бывших студентов, посещавших его лекции, по прошествии многих лет говорят, что два года занятий физикой с Фейнманом были для них событием, которое представляется раз в жизни. Но тогда это не было так очевидно. Многие из студентов испытывали боязнь перед занятиями, и по мере чтения лекций посещаемость зарегистрированных студентов стала пугающе падать. Но в то же время все больше и больше других студентов и аспирантов начинали посещать лекции. Лекционный зал оставался полным, и Фейнман так никогда и не узнал, что он теряет часть первоначальной аудитории. Но даже с точки зрения самого Фейнмана его педагогическое начинание не оказалось успешным. В 1963 г. он написал в предисловии к «Лекциям»: «Не думаю, что я очень хорошо справился со своей задачей». Перечитывая эти лекции, иногда кажется, что чувствуешь взгляд Фейнмана за своим плечом — но он обращен

не к его молодой аудитории, а напрямую к его коллегам, как бы говоря: «Вот! Смотрите, как я ловко обошелся с этой проблемой! Разве я не молодец?» Но даже тогда, когда ему казалось, что он совершенно четко объясняет что-то перво- или второкурсникам, не им это приносило наибольшую пользу. Главными ценителями его великих достижений были люди его же уровня — ученые, физики, профессора — которые имели возможность увидеть физику через призму свежей и динамичной точки зрения Ричарда Фейнмана.

Фейнман был более чем великим наставником. Его дар заключался в том, что он был выдающимся наставником преподавателей. Если бы целью «Фейнмановских лекций по физике» было подготовить определенный круг молодых студентов к сдаче экзамена по физике, то нельзя было бы сказать, что ему это особенно хорошо удалось. Более того, если бы эти лекции предназначались, чтобы стать основой вводного учебника по физике для университетов, пришлось бы сказать, что он не справился с такой задачей. Тем не менее, эти лекции были переведены на 10 иностранных языков, существуют также четыре двуязычных издания. Сам Фейнман считал, что его важнейшим вкладом в физику будет не КЭД или теория сверхтекучего гелия, или поляронов, или партонов. Его самым выдающимся вкладом будут эти три красные книги «Фейнмановских лекций по физике». Поэтому нет никаких сомнений в ценности настоящего памятного издания прославленных книг.

*Дэвид Л. Гудстейн
Гери Нойгебауэр*

Апрель 1989 г.

Калифорнийский
технологический институт

Предисловие автора

(Из «Лекций по физике»)

Это лекции по физике, которые я читал в прошлом и позапрошлом году для студентов первого и второго курсов КАЛТЕХ'а. Лекции переданы, конечно, не дословно: их приглашали, иногда довольно сильно, иногда не очень. Эти лекции составляют только часть полного курса. Весь поток из 180 студентов собирался в большой лекционной аудитории дважды в неделю, чтобы прослушать эти лекции, а затем они разбивались на маленькие группы по 15–20 человек для семинарских занятий под руководством ассистентов. Кроме того, раз в неделю были лабораторные работы.

Этими лекциями мы хотели достичь особой цели: поддержать интерес у молодых энтузиастов и сообразительных студентов, приходящих в КАЛТЕХ из средней школы. Они много слышали о том, как захватывающе интересна современная физика — теория относительности, квантовая механика и т. д. Но если бы этот курс читался так, как он читался раньше, то к концу двух лет многие из них испытывали бы большое разочарование, потому что на самом деле им предлагалось очень уж много грандиозных, новых, современных идей. Их заставляли изучать наклонные плоскости, электростатику и так далее, и после двух лет их энтузиазм сходил на нет. Было неясно, сможем ли мы создать курс, который удержал бы наиболее продвинутых и устремленных к знанию студентов, укрепив их энтузиазм.

Эти лекции никоим образом не задумывались как обзорный курс, напротив, их цель весьма серьезна. Я предполагал адресовать их наиболее сообразительным слушателям, добиваясь, если возможно, чтобы и самые понимающие студенты не могли полностью охватить все, что содержится в лекции. Для этого я подкидывал им мысли о возможных приложениях идей и концепций вне основного направления атаки. Именно по этой при-

чине я очень старался формулировать все свои утверждения как можно более точно, указывая в каждом случае, какие уравнения и идеи укладываются в физической картине мира, а также — когда они узнают немного больше — как что-то может измениться. Я также понимал, что для таких студентов важно указать, что они должны (если они достаточно сообразительны) уметь вывести сами из того, что было сказано ранее, а что вводится как нечто принципиально новое. Формулируя новые идеи, я пытался либо вывести их, если они были выводимы, либо объяснить, что это *действительно* новая идея, которая не основана ни на каких понятиях, уже известных им, и которая не считается доказуемой, а просто принимается.

Приступая к этим лекциям, я предполагал, что студенты кое-что знают, выходя из средней школы, — например, геометрическую оптику, простые понятия химии и т. д. Я также не видел никакого смысла располагать эти лекции в строгом порядке, чтобы нельзя было упоминать о чем-либо, что будет обсуждаться позже в подробностях. Упоминалось много разных вещей без их развернутого обсуждения. Эти детали предполагалось обсуждать подробнее позже, на более высоких ступенях их обучения. Например, так говорилось об индуктивности, энергетических уровнях, которые вначале давались очень приблизительно, а позже разрабатывались более полно.

Расчитывая на самых активных студентов, я не хотел забывать и о тех, для кого чрезмерное остроумие и многосторонние приложения будут только лишним поводом для волнения, и от кого вообще нельзя ждать, что они усвоят большую часть лекций. Таким студентам я хотел указать хотя бы на основное ядро или костяк материала, который они *могли* бы усвоить. И даже если бы кто-то не понял ничего из лекции, я надеялся, что это не вызовет у него раздражения. Пусть он поймет не все, но только центральное, самую суть. Конечно, он должен проявить некоторую сообразительность, чтобы понять, какие теоремы и какие идеи являются главными, а какие — более сложными или побочными вопросами и приложениями, которые он сможет понять лишь в последующие годы.

При создании этих лекций существовала одна серьезная трудность: в ходе чтения курса не работала обратная связь от студентов к лектору, позволяющая понять, насколько лекции достигают своей цели. Это действительно очень серьезная помеха, и я не знаю, насколько эти лекции хороши на самом деле.

Все это в сущности эксперимент. И если бы я взялся за него еще раз, я делал бы все иначе, но надеюсь, мне *не придется* делать этого еще раз! Думаю, однако, что, если говорить о физике, материал первой части проработан вполне удовлетворительно.

А вот второй частью я не так удовлетворен. В начале этой части курса, излагая темы электричества и магнетизма, я не мог помыслить о каком-то особенном или своеобразном способе изложения — таком, который вызывал бы больший интерес, чем обычный способ изложения этих тем. Так что я думаю, что мне удалось сделать немного в лекциях об электричестве и магнетизме. Изначально предполагалось, что после этой темы я прочту несколько лекций о свойствах твердых тел, но главным образом затрону такие вещи, как решения уравнений диффузии, колебательные системы, ортогональные функции и т. д., прорабатывая начала так называемого «метода математической физики». Бросая теперь взгляд назад, я думаю, что, случись мне читать такой курс еще раз, я вернулся бы к этой первоначальной идее. Но поскольку повторения этих лекций не планируется, мне предложили попытаться дать введение в квантовую механику — которое вы и найдете в конце курса.

Совершенно очевидно, что студенты, которые будут специализироваться в физике, могут подождать и до третьего года, когда им будет прочитан курс квантовой механики. С другой стороны, было высказано соображение, что многие студенты с моего курса изучают физику как основу для занятий другими науками. И обычный способ изучения квантовой механики делает этот предмет почти недоступным для огромного большинства студентов, поскольку его изучение требует слишком длительного времени. И все же, весь аппарат дифференциальных уравнений редко используется в своих областях приложения — особенно в своих наиболее сложных применениях, таких как электротехника и химия. Поэтому я попытался описать принципы квантовой механики так, чтобы это не требовало предварительного знакомства слушателя с математикой дифференциальных уравнений в частных производных. Думаю, эта задача — изложить квантовую механику в таком новом ключе — представляет интерес даже для физика (по нескольким причинам, которые станут очевидны уже из самих лекций). Однако я полагаю, что этот эксперимент с квантовой механикой был не вполне успешным — в значительной степени из-за того, что в конце у меня не было достаточно времени (мне не хватило трех-четы-

рех лекций, чтобы полнее разобрать такие темы, как энергетические полосы и пространственная зависимость амплитуд). Кроме того, я никогда ранее не излагал эту тему таким образом, и отсутствие обратной связи ощущалось особенно остро. Теперь я считаю, что квантовую механику следовало бы давать попозже. Может быть, когда-нибудь мне представится возможность прочитать такой курс еще раз. Тогда я сделаю лучше.

В этих лекциях не рассматривались решения задач, так как для этого проводились семинарские занятия. Хотя первые три лекции я посвятил решению задач, они не вошли в эту книгу. Также была прочитана лекция об инерционной навигации. Эта тема естественно должна была следовать за темой «вращающиеся системы», но при издании, к сожалению, она была опущена. Пятую и шестую лекции прочитал Мэтью Сэндс, поскольку меня тогда не было в городе.

Конечно, можно спросить, насколько успешным оказался этот эксперимент. Моя собственная точка зрения весьма пессимистична — хотя ее не разделяют большинство работающих со студентами преподавателей. Не думаю, что я хорошо обходился со студентами. Когда я наблюдал, как студенты решают задачи на экзаменах, мне казалось, что вся система потерпела крах. Конечно, мои друзья сказали, что один-другой десяток студентов все-таки, как ни удивительно, усвоили почти все содержание лекций, очень активно работали над материалом и понимали преподавателей интересными и толковыми вопросами. Они получили первоклассную подготовку в физике, и именно к ним, в конце концов, и были обращены мои лекции. Впрочем, «обучение редко приносит плоды кому-либо, кроме тех, кто предрасположен к нему, но им оно почти не нужно» (Гиббон).

Все-таки я не хотел оставлять за бортом нашей работы ни одного студента, как, по-видимому, получалось. Как больше помочь студентам? Может быть более тщательно поработать над составлением задач, которые прояснили бы некоторые идеи этих лекций. Решение задач очень помогает усвоить материал лекций и сделать представленные идеи более реалистичными, более завершенными.

Думаю, однако, что эту педагогическую проблему нельзя решить, не поняв, что наилучшее обучение возможно только при непосредственном личном контакте между студентом и хорошим учителем. Студент должен иметь возможность обсуждать различные идеи, размышлять и высказывать свои мысли. Не-

возможно многому научиться, просто сидя на лекции, или даже просто решая предложенные задачки. Но в наше время мы должны обучить столько студентов, что приходится искать какую-то замену этому идеалу. Может быть, мои лекции помогут в этом. Надеюсь, те, кто имеет возможность учиться и преподавать в индивидуальном порядке, смогут почерпнуть из моих лекций какую-то пользу и какие-то идеи. Возможно, они получат удовольствие, вникая в них — или развивая их дальше.

Ричард Фейнман

Июнь 1963 г.



1

Атомы в движении

Введение

Представляя этот двухгодичный курс физики, мы исходили из того, что вы, читатель, собираетесь быть физиком. Это, конечно, не обязательно, но это то, что предполагает каждый преподаватель по каждому предмету! Если вы собираетесь быть физиком, вам предстоит изучить очень многое — плоды двух сотен лет в самой быстро развивающейся области знания. Это так много, что вы, действительно, можете подумать, что это невозможно освоить за 4 года, и вы будете правы — придется еще идти в аспирантуру!

Как это ни удивительно, несмотря на колоссальную работу, которая была проделана за все это время, огромный объем ее результатов можно очень сильно сжать — выявив те *законы*, к которым сводятся все наши знания. И даже эти немногие законы так трудно усвоить, что было бы нечестно по отношению к вам начинать исследование этой обширной области, не снабдив вас некой картой или наброском взаимосвязи между различными частями науки. В соответствии с этими предварительными замечаниями, первые три главы будут содержать краткий очерк взаимоотношений физики с остальными науками, отношения наук друг к другу и значения науки как таковой. Это поможет «почувствовать» предмет.

Можно спросить, почему нельзя преподавать физику, просто перечислив основные законы на первой же странице, затем показывая, как они действуют во всех возможных случаях, как мы делаем в евклидовой геометрии, где мы устанавливаем аксиомы, а потом выводим разнообразные следствия. (Что же, не удовлетворенные четырехлетним курсом физики, вы хотите выучить ее за 4 минуты?) Мы не можем идти таким путем по двум

причинам. Во-первых, мы все еще *не знаем* всех основных законов: чем больше мы узнаем, тем больше встает вопросов. Во-вторых, точная формулировка законов физики предполагает использование некоторых очень нетривиальных идей, для описания которых требуется высшая математика. Поэтому необходима основательная предварительная подготовка уже для того, чтобы понять, смысл *слов*. Нет, излагать физику таким образом невозможно. Можно давать ее лишь по частям.

Каждый шаг в изучении природы как целого — это всегда лишь *приближение* к совершенной истине, или к тому, что мы считаем совершенной истиной. На самом деле, все, что мы знаем, является тем или иным приближением, потому что *мы знаем, что не знаем еще всех законов*. Так что мы учимся лишь для того, чтобы разучиваться, или, точнее, переучиваться.

Основной принцип науки, почти что ее определение, гласит: *всякое знание проверяется экспериментально*. Эксперимент — *единственный судья* научной «истины». Но каков источник знания? Откуда берутся те законы, которые подлежат проверке? Эксперимент, сам по себе, помогает выводить эти законы, дает направление нашим догадкам. Но необходимо также *воображение*, чтобы, следуя этому направлению, прийти к глубоким обобщениям — чтобы угадать лежащие в основе чудесные, простые и неожиданные предположения. И затем — вновь путем эксперимента проверять их. Этот процесс воображения настолько непросто, что между физиками существует разделение труда: одни из них — *теоретики*, которые воображают, рассуждают и предполагают новые законы, но не экспериментируют. И есть физики-экспериментаторы, которые ставят опыты, воображают, рассуждают и отгадывают.

Мы сказали, что законы природы приближительны: что сначала мы открываем «неправильные» законы, а потом «правильные». Но как может эксперимент быть «неправильным»? Во-первых, по самой простой причине — если вы не заметили, что приборы не в порядке. Но это легко исправить, все проверяя и перепроверяя. Но, если не останавливаться на таких деталях, как результаты эксперимента *могут* быть ошибочными? Лишь будучи недостаточно точными. Например, масса предмета, по видимости, никогда не меняется: вращающийся волчок весит столько же, сколько неподвижный. Так был изобретен «закон»: масса постоянна и не зависит от скорости. Теперь установлено, что этот закон неверен. Оказалось, что масса растет с ростом

скорости, но заметное изменение требует скоростей, близких к скорости света. *Правильный* закон гласит: если предмет движется со скоростью меньшей, чем 100 миль в секунду, масса постоянна с точностью в одну миллионную. В такой приближенной форме данный закон верен. Так что можно подумать, что на практике нет существенной разницы между старым законом и новым. Это и верно, и неверно. Для обычных скоростей мы, конечно, можем забыть о новом законе и использовать старый закон постоянства массы как достаточно точный. Но при высоких скоростях мы будем получать неверные результаты, и чем больше скорость, тем больше будет ошибка.

В конце концов, что самое интересное, с *философской* точки зрения мы *в корне заблуждаемся* с самого начала, принимая приблизительный закон. Вся наша картина мира должна полностью измениться, даже если масса меняется хоть на чуточку. Это очень своеобразная особенность законов на уровне философского осмысления. Даже очень незначительный эффект иногда требует глубокого пересмотра наших воззрений.

Так с чего же мы должны начинать обучение? Должны ли мы предлагать *правильный*, но необычный закон, с его странными и трудными понятиями, например, теорию относительно-сти, четырехмерное пространство-время и т. д.? Или же дать сначала простой закон «постоянства массы», который лишь приблизителен, зато не требует таких сложных понятий? Первый путь более приятный, заманчивый и мог бы доставить больше удовольствия, но со второго — проще начинать, и от него легче прийти к настоящему пониманию более сложных идей. Этот вопрос вновь и вновь встает при преподавании физики. На разных этапах мы будем решать его по-разному, но на любой ступени стоит учитывать уровень современных знаний, знать их точность, как это вписывается в общую картину и что может изменяться при дальнейшем развитии науки.

Итак, давайте перейдем к нашему очерку, или общей схеме, современного понимания науки (в частности, физики, но также и других близких к ней наук), чтобы впоследствии, когда мы сосредоточимся на каком-то вопросе, в нашем багаже уже было какое-то представление о том, почему это интересно, и как это вписывается в общую структуру.

Итак, *какова* же наша картина мира?

Вещество состоит из атомов

Если бы из-за некоей катастрофы все накопленные научные знания были бы уничтожены, и для последующих поколений живых существ сохранилось лишь одно предложение, то какое содержало бы наибольшую информацию при наименьшем количестве слов? Я считаю, что это — *атомная гипотеза* (или *атомный факт*, или как вам угодно его называть): *все тела состоят из атомов — маленьких частиц, которые пребывают в бесконечном движении и притягиваются друг к другу, когда их разделяет небольшое расстояние, но отталкиваются, если их прижимают плотнее друг к другу*. Как видите, в одном этом предложении огромное количество информации о мире, если только к нему приложить немного размышления и воображения.

Чтобы проиллюстрировать величие атомной идеи, представим себе каплю воды размером с полсантиметра. Даже очень пристально взглядевшись в нее, мы не увидим ничего, кроме воды, — однородной, сплошной воды. Даже если мы увеличим ее при помощи самого сильного из оптических микроскопов — примерно в 2000 раз, тогда капля воды станет размером в 10 метров, как большая комната, и если мы снова всмотримся в нее, то заметим маленькие шарики, плавающие туда-сюда. Очень интересно. Это парameции. Можно задержаться на этом и так заинтересоваться парameциями с их извивающимися ресничками и гибкими тельцами, что не двигаться дальше (если только не захочется заглянуть внутрь них). Это, конечно, важно для биологии, но сейчас мы двинемся дальше и будем всматриваться в саму субстанцию воды, увеличив нашу каплю еще в 2000 раз. Теперь она примет размеры около 20 километров в поперечнике, и если мы вновь присмотримся к ней очень внимательно, то заметим какое-то хаотичное движение. Поверхность уже не будет гладкой — она будет выглядеть примерно как толпа на футбольном стадионе, если на нее смотреть с большой высоты. Чтобы разобраться, что это за хаос, мы увеличим еще в 250 раз и увидим нечто подобное тому, что изображено на рис. 1.1. Это капля воды при увеличении в миллиард раз, но упрощенная в нескольких аспектах. Частицы изображены, как нам привычнее, с четкими границами — это первая неточность. Во-вторых, для простоты, они изображены почти схематично в двухмерной проекции, тогда как они, конечно, движутся в трех

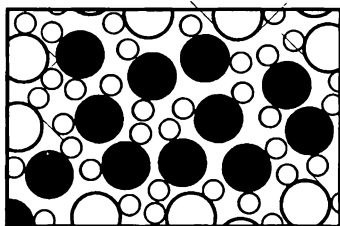


Рис. 1.1. Капля воды, увеличенная в миллиард раз

измерениях. На рисунке видны два вида «шариков» или кружочков, представляющих атомы кислорода (черные) и водорода (белые), каждый шарик кислорода соединен с двумя шариками водорода. (Каждая маленькая группа из атома кислорода с двумя атомами водорода называется молекулой.) Далее, картина упрощена в том отношении, что реальные частицы постоянно вибрируют и сталкиваются, поворачиваются и крутятся вокруг друг друга. Лучше представьте эту картину в движении, чем статичной. Еще одно обстоятельство, которое нельзя изобразить на рисунке, — это то, что в природе частицы «прилипают» друг к другу, что они притягиваются, эта тянет ту, и т. д. Вся группа как бы «склеена». С другой стороны, частицы не слишком тесно прижимаются друг к другу. Если попытаться прижать их слишком сильно, они оттолкнутся.

Радиус атомов 1 или 2×10^{-8} см. Отрезок в 10^{-8} см именуется ангстрем (просто другое название), так что мы говорим, что атомы имеют радиус 1 или 2 ангстрема (Å). Есть еще один способ представить себе их размер: если яблоко увеличить до размеров Земли, тогда атомы в яблоке сами станут размером с яблоко.

Вернемся к нашей капле воды со всеми этими склеенными вибрирующими частицами, тянущимися друг за другом. Вода сохраняет свой объем: она не распадается на части, вследствие притяжения молекул друг к другу. Если капля попадет на наклонную плоскость, по которой она сможет двигаться из одного места в другое, то она не исчезнет просто так, не разлетится на маленькие кусочки из-за молекулярного притяжения. Это хаотичное движение мы воспринимаем как *теплоту*: чем выше температура, тем интенсивнее движение. Если мы нагреваем воду, вибрация среди частиц усиливается, и промежутки между атомами увеличиваются. И если нагрев продолжается, то насту-

пает момент, когда притяжение между молекулами становится недостаточным для того, чтобы удерживать их вместе, и они действительно *разлетаются* и удаляются друг от друга. Конечно, так мы получаем из воды пар: при повышении температуры усиливается движение и частицы разлетаются.

На рис. 1.2 изображен пар. Это изображение неудачно в одном отношении: при обычном атмосферном давлении во всем помещении было бы не так много молекул воды, и уж точно их не набралось бы три штуки на таком промежутке, какой изображен на этом рисунке. Большинство квадратов такого размера не содержали бы ни одной молекулы. Но на картинке, чтобы она не была совсем пустой, нам изобразили две с половиной, или три молекулы. Рассматривая пар, мы можем увидеть характерные черты молекулы воды более четко. Для простоты на этом рисунке между атомами водорода дан угол 120° . На самом деле угол равен $105^\circ 3'$, а расстояние между центрами атомов кислорода и водорода равно $0,957 \text{ \AA}$, так что мы представляем эту молекулу довольно неплохо.

Давайте рассмотрим некоторые свойства водяного пара или любого другого газа. Молекулы, будучи отделены одна от другой, будут ударяться о стенки сосуда. Представьте себе комнату с кучей теннисных шаров (сто или больше), без конца прыгающих по ней. Град их ударов будет давить на стенки изнутри (так что нам придется придерживать их извне). Наши грубые органы чувств (их чувствительность ведь не увеличилась в миллиард раз) ощущают этот град ударов лишь как *обычный нажим*. Чтобы удерживать газ в каком-то объеме, мы должны приложить некоторое давление. На рисунке 1.3 показан обычный сосуд для содержания газов (использующийся во всех учебниках) — цилиндр с поршнем. В данном случае форма молекул воды не имеет значения, поэтому для простоты мы изобразим

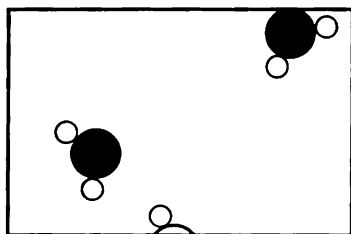


Рис. 1.2. Пар под микроскопом

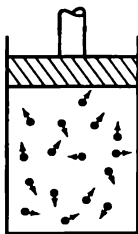


Рис. 1.3. Цилиндр с поршнем

их в виде теннисных мячиков или просто точек. Они беспрерывно движутся во всех направлениях. Ударяясь о верхний поршень, множество молекул постоянно стремится вытолкнуть его из сосуда, и, чтобы воспрепятствовать этому, нам придется приложить к поршню определенную силу — *давление* (на самом деле сила — это давление, умноженное на площадь). Ясно, что сила пропорциональна площади, так как, если мы увеличим площадь, сохранив то же число молекул в кубическом сантиметре, то число столкновений с поршнем увеличится во столько раз, во сколько раз увеличилась площадь.

Теперь давайте поместим в тот же сосуд в два раза больше молекул, увеличив вдвое их плотность. Пусть их скорость (и, соответственно, температура газа) останется такой же. Тогда, в довольно строгом приближении, число столкновений удвоится, а поскольку каждое из них будет столь же «энергичным», как и раньше, то давление будет пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил, действующих между атомами, мы могли бы ожидать небольшого снижения давления за счет увеличения притяжения между атомами, и небольшого роста давления из-за того, что они занимают конечный объем пространства. Тем не менее, с хорошей степенью точности, если плотность достаточно низкая и число атомов не слишком велико (т. е. при невысоких давлениях), *давление пропорционально плотности*.

Можно увидеть еще кое-что. Если мы повысим температуру газа (скорость атомов), не изменяя его плотности, что произойдет с давлением? Атомы будут с большей силой ударять о поршень, так как они движутся быстрее, и кроме того, ударять более часто, следовательно, давление возрастет. Вы видите, насколько просты идеи атомной теории.

Давайте рассмотрим другое явление. Предположим, что поршень двинулся внутрь, так что пространство, занимаемое атомами, медленно уменьшается. Что происходит, когда атом ударяется о движущийся поршень? Конечно, после удара его скорость повышается. Вы можете сами убедиться в этом, ударя мячик для настольного тенниса движущейся ракеткой, и вы увидите, что он отскакивает с большей скоростью, чем до удара. (Характерный пример: если случится, что атом будет неподвижен, и поршень ударит по нему, он, конечно, придет в движение.) Так что атомы, отлетев от поршня, становятся «горячее», чем были до столкновения с ним. Следовательно, возрастает скорость всех атомов, находящихся в сосуде. Это означает, что *если мы медленно сжимаем газ, его температура возрастает*. При медленном *сжатии* газа температура *возрастает*, при медленном *расширении* — *понижается*.

Теперь вернемся к нашей капле воды и пойдем в другом направлении. Допустим, что мы понижаем ее температуру. Тогда вибрация молекул воды будет постепенно снижаться. Мы знаем, что между атомами существуют силы притяжения, так что через какое-то время они уже не смогут так вибрировать. Что бывает при очень низкой температуре, показано на рис. 1.4: молекулы сплетаются в новый узор. Образовался лед. Это схематическое изображение льда неточно, поскольку двумерно, но все же оно дает правильное представление. Интересно, что в веществе *каждый атом занимает определенное место*. Можно легко представить, что если бы нам удалось каким-то образом расположить все атомы на одном конце нашей капли в некотором порядке, то, в силу жесткой структуры атомных связей на другом конце в километрах отсюда (при нашем увеличении) атомы также займут строго определенное положение. Поэтому если мы потянем ледяную сосульку за один конец, другой ее конец не отделится, в отличие от воды, атомы которой беспорядочно движутся во всех направлениях. Таким образом, отличие между твердыми телами и жидкостями заключается в том, что в первых атомы выстроены в особом порядке, именуемом *кристаллической решеткой*, так что положение атомов на одном конце кристалла находится в строгой зависимости от расстановки атомов на противоположном конце, даже если их разделяют миллионы других атомов. На рис. 1.4 показана расстановка молекул льда, и хотя она отражает кое-какие свойства льда, в реальности порядок иной. Одно из характерных

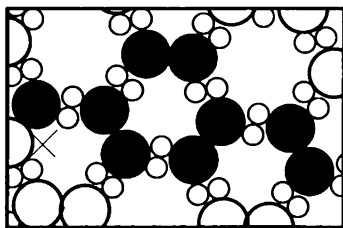


Рис. 1.4. Молекулы льда

свойств, отраженных здесь, — это присутствие симметричных шестиугольников. Можно видеть, что при повороте на 120° воспроизводится тот же рисунок. То есть, льду свойственна симметрия, которая объясняет шестиугольную форму снежинок. Еще из этого рисунка можно понять, почему лед, растаяв, занимает меньший объем. Изображенная здесь разновидность кристаллической решетки имеет много «дыр», как и структура настоящего льда. Когда система разрушается, эти дырочки могут быть заполнены молекулами. Большинство простых веществ, за исключением воды и типичных металлов, при плавлении *расширяются*, так как в твердых кристаллах атомы плотно упакованы, а в жидком состоянии им требуется больше места для колебаний. Неплотные же кристаллы, такие как лед, при разрушении сжимаются.

Хотя лед обладает жесткой кристаллической структурой, его температура может меняться — в нем есть запас тепла. Мы можем, если пожелаем, изменить количество этого тепла. Что же это за тепло? Атомы льда не пребывают в неподвижности. Они вибрируют и колеблются. Даже когда существует определенный порядок в кристалле (структура), все атомы вибрируют «на месте». При повышении температуры они будут вибрировать со все большей амплитудой, пока, наконец, не станут выбивать друг друга со своих мест. Это называется *плавлением*. С понижением температуры вибрация все уменьшается до тех пор, пока, при абсолютном нуле, количество вибрации не станет минимально возможным для атома; но оно *не будет равно нулю*. Этого наименьшего количества движения, которое может иметь атом, недостаточно, чтобы расплавить тело. Есть исключение: гелий. Движение атомов гелия просто снижается до предельного минимума, но даже при абсолютном нуле этого движения все еще до-

статочно для того, чтобы гелий не замерз. Даже при абсолютном нуле гелий не замерзает, если только не сжимать его под высоким давлением. Повышая давление, мы *можем* получить твердый гелий.

Атомные процессы

Вот сколько можно сказать с атомной точки зрения о твердых телах, жидкостях и газах. Однако атомная гипотеза описывает также *процессы*, поэтому мы теперь перейдем к рассмотрению ряда процессов с точки зрения атомной теории. Вначале рассмотрим процессы, происходящие на поверхности воды. Что здесь происходит? Сделаем теперь картину более сложной — и более близкой к реальности — представим, что поверхность воды соприкасается с воздухом. Рисунок 1.5 показывает границу между водой и воздухом. Мы видим, что молекулы воды, как и раньше, образуют жидкость, но теперь здесь изображена и ее поверхность. Над ней мы видим различные молекулы: во-первых, там есть молекулы воды в парообразном состоянии. Это *водяной пар*, который всегда присутствует над водной поверхностью (между паром и водой существует равновесие, которое будет рассмотрено позже). Кроме того, мы обнаруживаем здесь ряд других молекул: вот два атома кислорода соединились, образовав *молекулу кислорода*; вот два атома азота, также слипшиеся в молекулу азота. Воздух состоит почти полностью из азота, кислорода, некоторого количества водяного пара и меньших долей углекислого газа, аргона и прочего. Так что над поверхностью воды находится воздух — газ, содержащий водяной пар. Что происходит на этом рисунке? Молекулы воды постоянно движутся. Время от времени одна из

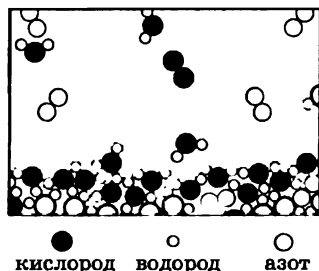


Рис. 1.5. Молекулы воды, испаряющиеся в воздух

них, оказавшись на поверхности, получает толчок чуть сильнее, чем обычный, и выталкивается прочь. Это трудно показать на картинке, потому что она *неподвижна*. Но мы можем представить, что та или иная из молекул воды у поверхности только что испытала удвар и теперь улетает вверх. Так, молекула за молекулой вода исчезает — она испаряется. Но если мы *закроем* сосуд сверху, то через какое-то время среди молекул находящегося в нем воздуха обнаружится значительное количество молекул воды. Время от времени какая-то из этих молекул пара подлетает к поверхности воды и снова пристает к ней. Таким образом мы видим, что, казалось бы, мертвая, неинтересная вещь — стакан воды с крышкой, который стоял здесь, может быть, двадцать лет, — оказывается, таит в себе сложный и интересный, непрерывно идущий динамический процесс. Для нашего грубого зрения, в нем ничего не происходит, но если бы мы могли стать в миллиард раз зорче, то увидели бы, что там, внутри, постоянно что-то меняется: одни молекулы покидают поверхность, другие возвращаются.

Почему мы *не замечаем этих изменений*? Потому что испаряется ровно столько молекул, сколько осаждается! И с течением времени «ничего не происходит». Если же мы снимем крышку сосуда, и влажный воздух в нем сменится сухим, тогда число испаряющихся молекул останется точно таким же, так как это зависит от температуры воды, а число возвращающихся значительно сократится, так как над водой станет гораздо меньше молекул воды. Число улетающих молекул превысит число оседающих, и вода будет испаряться. Так что, если вы хотите, чтобы вода испарялась, включите вентилятор!

Остается еще вопрос: какие именно молекулы отрываются от поверхности воды? Когда молекула выбивается, причиной тому служит аккумуляция несколько большего, чем обычно, количества энергии, которое требуется, чтобы оторвать молекулу от притяжения ее соседей. Следовательно, если энергия вылетающих молекул выше среднего, то энергия оставшихся молекул воды становится *меньше*. Движение их уменьшается. Поэтому жидкость при испарении постепенно остывает. И, конечно, когда молекула пара из воздуха приближается к поверхности воды, между ней и поверхностью возникает вдруг большое притяжение. Это ускоряет вновь прибывшую молекулу, и возникает новое тепло. То есть, покидая воду, молекулы уносят с собой тепло; возвращаясь — приносят. Когда испарение уравнивается

конденсацией, баланс сходится — температура воды не меняется. Если же мы дуем на воду, чтобы поддерживать постоянное преобладание числа испаряющихся молекул, то вода будет остывать. Поэтому дуйте на суп, чтобы остудить его!

Конечно, вы должны понимать, что процессы, только что описанные нами, на самом деле гораздо более сложны. Не только вода испаряется, но порой и молекула кислорода или азота коснется поверхности и «затеряется» среди массы молекул воды. Молекулы кислорода и азота проникают в воду, это означает растворение воздуха в воде. Если мы внезапно откачаем воздух из сосуда, то молекулы воздуха будут покидать воду быстрее, чем поступать назад, и наверх будут подниматься пузырьки. Это явление очень вредно для водолазов, как вы, наверное, знаете.

Теперь перейдем к другому процессу. На рис. 1.6 представлено (с атомной точки зрения) твердое тело, растворяющееся в воде. Что будет, если бросить в воду кристаллик соли? Соль — это твердое тело, кристалл, в котором «атомы соли» расставлены правильными рядами. На рис. 1.7 показана трехмерная структура обычной соли, хлорида натрия. Строго говоря, кристалл состоит не из атомов, а из так называемых *ионов*. Ион — это атом, у которого либо есть лишние электроны, либо их не хватает. В кристалле соли содержатся ионы хлора (атомы хлора с избыточным электроном) и ионы натрия (атомы натрия с недостающим электроном). В твердой соли все ионы связаны силами электрического притяжения, но когда кристалл попадает в воду, некоторые ионы, под воздействием притяжения отрицательного кислорода и положительного водорода, начинают сво-

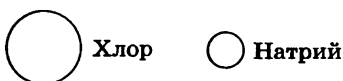
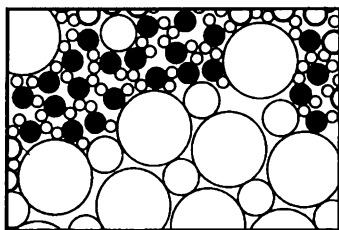


Рис. 1.6. Молекулы соли, растворенной в воде

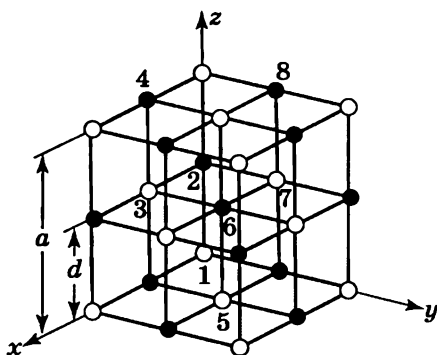


Рис. 1.7. Структура кристалла соли

бодно двигаться. На рис. 1.6 мы видим, как от кристалла отрывается ион хлора, а другие атомы плавают в воде в виде ионов. Эта картинка была составлена с умом. Обратите внимание, например, что молекулы воды повернуты к ионам хлора почти всегда своими атомами водорода, а к ионам натрия — атомами кислорода, потому что ион натрия положителен, а атом кислорода в составе молекулы воды — отрицателен, и они электрически притягиваются друг к другу. Можем ли мы сказать по этой картинке, *растворяется* ли здесь соль в воде или, наоборот, *кристаллизуется*? Конечно, *нет*, поскольку в то время как одни атомы покидают кристалл, другие возвращаются к нему. Этот процесс *динамический*, точно так же, как и испарение. Все зависит от количества соли в воде — превышает ли оно тот уровень, который требуется для равновесия, или меньше этого уровня. Под равновесием мы имеем в виду такое состояние, когда количество уходящих атомов в точности совпадает с количеством возвращающихся. Если в воде почти нет соли, больше атомов будет покидать кристалл, чем возвращаться к нему, и соль растворится. Если, наоборот, слишком много «соляных атомов», то возвращаться будет больше ионов, чем теряться, и соль будет кристаллизоваться.

Отметим мимоходом, что понятие *молекулы* вещества только приблизительно и имеет смысл только для некоторых видов веществ. В случае с водой ясно, что три атома действительно соединились вместе. Но в случае хлорида натрия в кристалле это не ясно. Просто ионы натрия и хлора выстроены в определен-

ную кубическую структуру, и в природе они никогда не образуют «молекулу соли».

Вернемся к нашему вопросу о растворении и осаждении. Если мы повысим температуру соляного раствора, то количество атомов, покидающих кристалл, возрастет, но также возрастет и количество осаждаемых. Вообще оказывается очень трудно предсказать, как поведет себя тот или иной раствор. Большинство веществ с ростом температуры растворяются сильнее, а у некоторых растворимость падает.

Химические реакции

Во всех процессах, которые мы описывали до сих пор, атомы и ионы не обменивались партнерами, но, конечно, бывают ситуации, когда сочетание атомов меняется, образуя новые молекулы. Это показано на рис. 1.8. Процесс, в котором связи между атомами подвергаются перестройке, называется *химической реакцией*. Другие процессы, о которых мы говорили до этого, называются физическими процессами, но между теми и другими нет четкого различия. (Природе все равно, как мы называем это, она просто делает свое дело.) Предполагается, что на этой картинке изображен углерод, сгорающий в кислороде. В молекуле кислорода *два* атома соединены очень крепко. (А почему не соединяются *три* или *четыре*? Это одна из очень важных характеристик подобных атомных процессов. Атомы очень своеобразны: они предпочитают определенных партнеров, определенные направления и т. д. Дело физики — проанализировать, почему они обладают именно такими склонностями. Во всяком случае, два атома кислорода, образуя молекулу, очень этим довольны.)

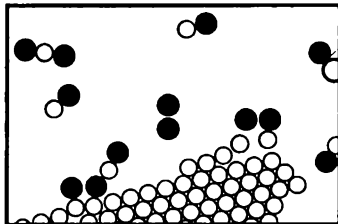


Рис. 1.8. Уголь, горящий в кислороде

Предположим, что углерод имеет кристаллическую форму (которая может быть либо графитом, либо алмазом*). Тогда одна молекула кислорода может приблизиться к углероду, каждый атом кислорода подхватит один атом углерода и они улетят уже в новом сочетании — «углерод-кислород» — которое является молекулой угарного газа. Его химическое обозначение CO . Очень просто: буквы « CO » — это фактически изображение данной молекулы. Но углерод притягивает кислород гораздо больше, чем кислород притягивает кислород или углерод — углерод. Поэтому в данный процесс кислород входит с относительно небольшой энергией, но кислород и углерод хватаются друг за друга с огромной жадностью и сообщают энергию всему вокруг. Таким образом генерируется большое количество энергии движения (кинетической энергии). Это, конечно, и есть *горение*; мы получаем *тепло* от соединения углерода и кислорода. Теплота обычно проявляется в виде движения горячего газа, но в некоторых случаях ее может быть так много, что она производит *свет*. Так получается *огонь*.

Кроме того, окись углерода не вполне насыщена. Она может присоединить еще один атом кислорода, и тогда мы получим гораздо более сложную реакцию, в которой кислород соединяется с углеродом, причем в то же время происходит столкновение с молекулой окиси углерода. Один атом кислорода может присоединиться к CO и образовать в конце концов молекулу, составленную из одного атома углерода и двух атомов кислорода, которая обозначается CO_2 и называется углекислым газом (или двуокисью углерода). Если углерод сжигается при большом недостатке кислорода очень быстро (например, в двигателе автомобиля, где взрывы настолько часты, что для образования углекислого газа нет времени), то образуется значительное количество угарного газа. В ходе многих подобных реакций высвобождается огромное количество энергии, производя взрывы, вспышки огня и т. д., все зависит от типа и условий реакции. Химики изучали такие сочетания атомов и обнаружили, что всякое вещество — это некоторое *сочетание атомов*.

Чтобы объяснить эту мысль, рассмотрим другой пример. Если мы идем по полю, усеянному маленькими фиалками, то мы чувствуем «их запах». Это определенный вид *молекулы*, или сочетания атомов, проник в наши носы. Во-первых, *как он про-*

* Алмаз может гореть в воздухе.

ник туда? Это в общем просто. Если запах — это некоторый род молекул, носящихся в воздухе туда-сюда, то они могут *случайно* попасть в нос. Конечно, у них нет особенного желания попадать туда. Это лишь крохотная часть хаотичной массы молекул, бесцельно блуждая, оказывается вдруг в нашем носу.

Теперь химики могут взять такие молекулы запаха фиалок, проанализировать их и узнать *точное расположение* атомов в пространстве. Мы знаем, что молекула углекислого газа прямая и симметричная: $O-C-O$. (Это можно легко установить также и средствами физики.) Однако даже для несравненно более сложных атомных структур, известных в химии, после длительного, увлекательного анализа можно понять пространственное расположение атомов. На рис. 1.9 показан воздух над фиалками. Снова мы видим здесь азот и кислород, а также водяной пар. (Почему здесь оказался водяной пар? Потому что фиалка *влажная*. Все растения испаряют воду.) Но среди них мы видим также «монстра», состоящего из атомов углерода, водорода и кислорода, которые выстроились в своеобразный узор. Это гораздо более сложное расположение атомов, чем в молекуле углекислого газа; на самом деле, это потрясающе сложное расположение. К сожалению, на картинке нельзя изобразить все, что известно химии об этой молекуле, так как расположение атомов в ней трехмерно, а у картинки лишь два измерения. Шесть атомов углерода, составляющих кольцо, образуют не плоское кольцо, а «гармошкой». Все углы и расстояния в ней известны. Так вот, химическая *формула* — это просто схема такой молекулы. Когда химик пишет такую формулу на доске, он пытается, грубо говоря, «растянуть» ее в двух измерениях. Например, мы видим «кольцо» из шести атомов углерода, и углеводную «цепочку», свисающую с одного конца. Второй атом углерода с конца связан с кислородом, крайний — с тремя

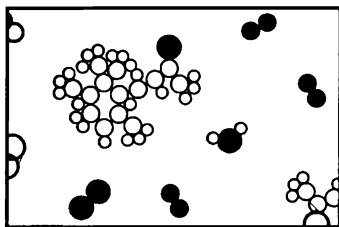


Рис. 1.9. Запах фиалки

атомами водорода, здесь два атома углерода соединились с тремя атомами водорода и т. д.

Как же химик узнаёт, каково пространственное расположение атомов? Он смешивает вещество из двух пробирок, и если оно краснеет, это говорит ему, что оно состоит из одного атома водорода и двух присоединенных к нему атомов углерода; если же оно окрашивается в голубой цвет, то это ничего не значит. Эта разновидность исследовательской работы — одна из самых удивительных, и ею занимается органическая химия. Чтобы выяснить расположение атомов в этих невероятно сложных сочетаниях, химик смешивает два вещества и наблюдает, что происходит. Физик никогда не поверит, что химик знает, о чем говорит, описывая пространственное расположение атомов. Уже двадцать лет назад появился физический метод, дающий возможность в некоторых случаях посмотреть на подобные молекулы (не совсем такие же сложные, как эта, но содержащие часть ее) и определить место каждого атома не путем сравнения цветов, а *по измерению расстояний между атомами*. И вот — оказывается — химики почти всегда правы!

На самом деле оказалось, что в запахе фиалки присутствуют три различные молекулы, которые отличаются только расположением атомов водорода.

Одна из проблем химии — как придумать такое название для вещества, чтобы по нему можно было узнать, какое оно. Найти имя для его формы! Но в названии нужно отразить не только форму, но и порядок следования атомов — здесь кислород, там водород — указать, где в точности расположен каждый атом. Так что можно догадаться, что химические названия должны быть сложными, чтобы быть точными. Название молекулы запаха фиалок поэтому таково: 4-(2,2,3,6 тетраметил-5-циклогексан)-3-бутен-2-он. Оно полностью описывает строение молекулы

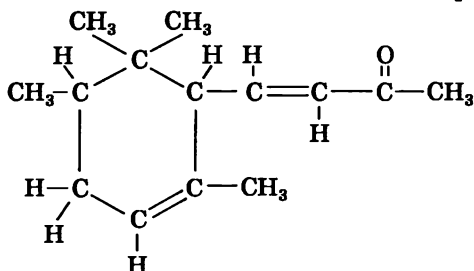


Рис. 1.10. Структурная формула молекулы запаха фиалки

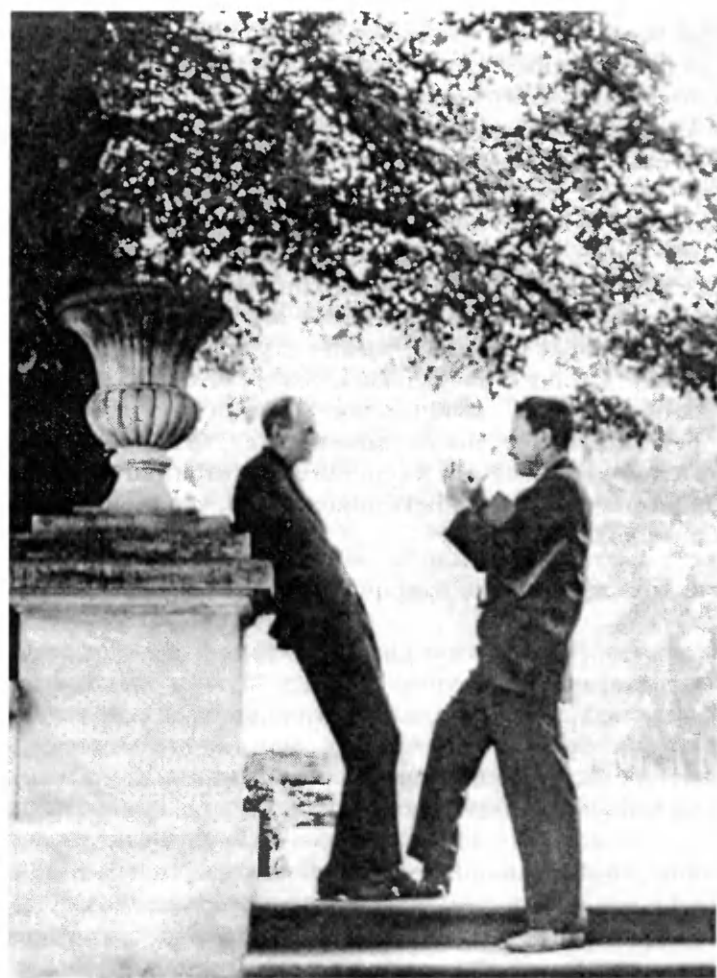
лы, а его длина объясняется сложностью молекулы. Химики вовсе не хотят сделать свое знание непонятным для непосвященных, просто перед ними стоит очень сложная задача описать молекулу словами!

Откуда же мы *знаем*, что атомы действительно существуют? При помощи одной уловки, которую мы описали выше: мы *предполагаем*, что атомы существуют, а затем получаем результаты, согласующиеся с этими предсказаниями, какими они должны быть, если всё состоит из атомов. Есть также несколько более прямое доказательство: атомы настолько малы, что их невозможно увидеть при помощи оптического микроскопа, даже при помощи *электронного* микроскопа. (При помощи оптического микроскопа можно видеть лишь гораздо более крупные объекты.) Но атомы находятся в постоянном движении, и если мы поместим в воду большой шарик другого вещества (намного больший, чем атомы), этот шарик начнет хаотично двигаться — очень похоже на игру в пушбол, в которой множество людей толкают огромный мяч. Они толкают его в разные стороны, и мяч движется по полю непредсказуемо. Подобным образом и здесь: «большой мяч» будет двигаться из-за различной силы ударов то с одной, то с другой стороны. Поэтому, если рассмотреть очень крохотные частицы, взвешенные в воде (коллоид), через очень хороший микроскоп, мы увидим постоянное метание частиц — итог бомбардировки их атомами. Это называется *броуновским движением*.

Другое подтверждение существования атомов дает структура кристаллов. Во многих случаях структуры, которые можно определить при помощи рентгеновского анализа, согласуются с теми, которые кристаллы действительно имеют в природе. Углы между различными гранями кристалла согласуются с точностью до секунд дуги с углами, вычисленными исходя из предположения, что кристалл состоит из «слоев» атомов.

Все состоит из атомов. Это самое основное утверждение. Например, самое важное предположение биологии — *все, что делают животные, совершают атомы*. Иначе говоря, *что бы ни делали живые существа, это можно понять с той точки зрения, что они состоят из атомов, действующих по законам физики*. Это не было известно с самого начала: потребовалась некоторая экспериментальная и теоретическая работа, чтобы появилась эта гипотеза, но теперь она общепринята и приносит огромную пользу для порождения новых идей в области биологии.

Если и кристаллик соли, и стальной кубик — лишь определенные сочетания атомов, но при этом они могут иметь столь различные свойства; если вода — эти мириады одинаковых капелек, заполняющих Мировой Океан, — может пениться и шумным прибоем обрушиваться на берег, образуя узоры на песке; если все это — вся многообразная жизнь водной стихии — производится одними лишь атомами, то *сколько же еще в них скрыто возможностей?* Если атомы не будут просто выстраиваться в какие-то определенные, без конца повторяющиеся структуры, пусть даже образуя иногда замысловатые молекулы, наподобие запаха фиалок, а вместо этого выстроятся так, что порядок будет *всегда и везде разный*, и разные атомы будут многообразно сочетаться, нигде не повторяя свой узор, — насколько более изумительные образования они могут произвести? Возможно ли, что эти «тела», которые сейчас ходят перед вами туда-сюда, говорят с вами — просто сгустки атомов, соединенных и действующих настолько сложно, что эта невероятная сложность поражает воображение? Когда мы говорим, что мы — сгустки атомов, мы не имеем в виду, что мы *просто* множества атомов, потому что лишь такой сгусток, который никогда не повторяется, может быть похож на то, что вы видите перед собой в зеркале.



2

Основы физики

Введение

В этой главе мы рассмотрим самые основные представления современной физики — природу вещей, как мы сейчас ее представляем. Мы не будем останавливаться на истории того, как стало известно, что все эти представления истинны; вы узнаете это в свое время.

Те вещи, с которыми мы имеем дело в физике, являются нам в обилии различных форм и с множеством различных свойств. Например, если мы стоим на берегу и смотрим на море, нам предстают вода, волны прибоя, пена, хлюпанье воды, шум, запахи, ветер и облака, солнце, голубое небо и свет; тут есть песок и камни различной твердости и прочности, цвета и строения. Здесь рыбы и водоросли, их жизнь и гибель, и вы, стоящий на берегу. Возможно, здесь даже присутствуют счастье и мысль. И в любом другом месте в природе вы встретите не меньшее разнообразие явлений и влияний, и столкнетесь с их огромной сложностью. Любопытство толкает нас к тому, чтобы задавать вопросы, ухватить суть вещей и понять это множество явлений как, возможно, вытекающее из действия сравнительно небольшого количества простейших процессов и сил, в их бесконечно разнообразных сочетаниях.

Мы спрашиваем себя: песок — это то же самое, что камни? То есть, не является ли песок просто огромным множеством крошечных камней? Является ли Луна большим камнем? Тогда поняв, что такое камни, пойдем мы также песок и Луну? Ветер — это такой же всплеск воздуха, как всплеск воды в море? Какие общие черты имеют различные движения? Что общего между всевозможными видами звука? Сколько есть различных цветов? И так далее. Таким образом мы пытаемся проанализи-

ровать все вокруг, связать то, что нам кажется несвязуемым, в надежде, что нам удастся *сократить* количество *различных* явлений и тем самым понять их лучше.

Несколько веков назад был изобретен способ, позволяющий найти частичные ответы на подобные вопросы. *Наблюдение, размышление и эксперимент* составляют то, что называется *научным методом*. Нам придется ограничиться простым описанием фундаментальных идей физики, или основополагающих представлений, выросших из применения научного метода.

Что значит для нас «понять» что-либо? Можно представить, что это сложнейшее сочетание движущихся объектов, которое и есть «мир», — это что-то вроде шахматной игры, в которую играют боги, а мы наблюдаем ее со стороны. Мы не знаем, каковы правила игры; все, что нам разрешили, — просто *смотреть*, как играют. Конечно, если мы наблюдаем достаточно долго, в конце концов мы можем уловить некоторые из правил. *Фундаментальная физика — и есть такие правила игры*. И даже если бы мы знали все правила, это не значит, что мы поняли бы, почему в игре делаются именно такие ходы, из-за их сложности или ограниченности нашего ума. Если вы играете в шахматы, то должны знать, что выучить все правила несложно, и все же часто очень сложно избрать самый лучший ход или понять, почему игрок делает именно такой ход. То же и в природе, только в гораздо большей степени. Не исключено, что в конце концов все правила будут найдены, но пока не все они нам известны. (Время от времени вдруг происходит какая-то рокировка, которую мы все еще не понимаем.) Помимо того, что мы не знаем всех правил, круг явлений, которые мы можем объяснить на их основе, очень ограничен, потому что почти все реальные ситуации настолько сложны, что мы не можем участвовать в игре, просто следуя правилам, и еще менее — предугадать очередной ход. Поэтому мы должны ограничиться самыми основными правилами игры. Если мы знаем правила, то уже считаем, что «понимаем» мир.

Откуда мы можем знать, что правила, которые мы «угадываем», справедливы на самом деле, если мы не можем проанализировать игру до конца? Грубо говоря, есть три способа проверки. Во-первых, возможны ситуации, когда природа сама, или с нашей помощью, производит формы простые, состоящие всего из нескольких частей, тогда мы можем в точности предсказать, что произойдет, и таким образом проверить наши правила в

действии. (В одном углу шахматной доски может оказаться лишь несколько фигур, и тогда мы можем легко представить их ходы.)

Второй хороший способ проверки правил — использовать более общие правила, выводимые из них. Например, слон по правилам ходит только по диагонали. Из этого можно заключить, что, сколько бы ходов ни было сделано, слон останется на клеточке того же цвета, что и в начале. Поэтому, даже не вникая в детали, мы всегда можем проверить наше предположение о слоне, определяя, действительно ли слон находится на клеточке того же цвета. Конечно, он будет долго соответствовать этому правилу, пока вдруг мы не обнаружим его на клетке *другого* цвета (что, конечно, может случиться, если он был побит, пешка прошла на последнюю горизонталь и превратилась в слона). Вот так бывает и в физике. Долгое время мы имеем правило, которое отлично работает всегда и повсюду, даже когда мы не можем понять тонкостей игры, и потом, в один прекрасный момент, мы обнаруживаем *новое правило*. С точки зрения основ физики, наибольший интерес представляют как раз явления в таких *новых* местах, где правила *не работают* — а не те, где они действуют. Именно так открываются новые правила.

Третий способ убедиться, правильны ли наши представления об игре, относительно неточен, но зато самый мощный из всех. Это путь грубых *приближений*. Хотя мы можем и не знать, почему Алехин двигает *именно эту фигуру*, возможно, мы можем *приблизительно* понимать, что он собирает фигуры вокруг короля, чтобы защитить его, потому что это наиболее разумно в данной ситуации. Подобным же образом, мы часто более или менее можем понять природу, даже не понимая, что делает каждая фигура в отдельности, если использовать терминологию шахматной игры.

Когда-то все явления природы были примерно разбиты на классы, такие как тепло, электричество, механика, магнетизм, свойства веществ, химические явления, свет (или оптика), рентгеновские лучи, ядерная физика, тяготение, мезонные явления и т. д. Однако целью является — увидеть *природу* как различные стороны *единой совокупности* явлений. Такова сегодня проблема фундаментальной теоретической физики — *обнаружить законы, стоящие за опытом; объединить эти классы*. История показывает, что раньше нам всегда удавалось их слить, но с ходом времени обнаруживались новые открытия, и

опять вставала задача их включения в общую схему. С объединением все было очень хорошо, пока, совершенно неожиданно, не были обнаружены рентгеновские лучи. Потом мы продвинулись еще немного, и тут было открыто существование мезонов. Так что на каждой стадии игры до объединения оказывается далеко. Значительная часть явлений слита воедино, но всегда остаются обрывки и куски, которые торчат в разные стороны. Так обстоят дела и сейчас, и мы попытаемся это описать.

Вот некоторые исторические примеры слияния: во-первых, *теплоту* удалось свести к *механике*. Чем сильнее движутся атомы, тем больший запас тепла содержит система; поэтому *теплота и все температурные эффекты могут быть поняты при помощи законов механики*. Другим чрезвычайно важным слиянием было открытие связи между электричеством, магнетизмом и светом, которые оказались различными аспектами одного и того же явления, которое мы сейчас называем *электромагнитным полем*. Еще одно слияние — это объединение химических явлений, свойств различных веществ, с поведением атомных частиц в рамках *квантовой химии*. Возникает естественный вопрос: удастся ли в будущем объединить *всё*, и обнаружить, что весь мир представляет собой различные стороны *единого*? Этого никто не знает. Все, что нам известно, — продвигаясь в познании, мы обнаруживаем, что можем объединить фрагменты картины, а потом мы обнаруживаем, что некоторые фрагменты не подходят, и не остается ничего иного, как продолжать биться над этой головоломкой. Ограничено ли в ней число фрагментов, и вообще есть ли у нее границы, мы, конечно, не знаем. Это не будет известно никогда до тех пор, пока мы не составим вместе все части головоломки. Если это вообще когда-нибудь случится. Здесь мы просто хотим показать, насколько продвинулся вперед этот процесс слияния, и насколько сейчас удастся понимать основные явления, исходя из минимального набора принципов. Или, выражаясь проще, *из чего все состоит и сколько есть несводимых друг к другу элементов?*

Физика до 1920 года

Довольно сложно начать сразу с современных взглядов, поэтому мы рассмотрим вначале, как все представлялось примерно в 1920 г., а потом изменим несколько фрагментов этой картины. До 1920 г. наша картина мира была примерно такой: «сце-

на», на которой выступает вселенная, — это трехмерное геометрическое *пространство*, описанное Евклидом; а изменения происходят в среде, которая называется *время*. Элементами на сцене являются *частицы*, например, атомы, которые обладают некоторыми *свойствами*, скажем, свойством инерции: если частица движется, она будет продолжать двигаться в том же направлении, если на нее не действуют никакие *силы*. Вторым элементом, следовательно, являются *силы*, которые тогда разделялись на два вида: первый, невероятно сложная, тонкая разновидность — сила взаимодействия, которая удерживает разнообразные атомы в различных сложнейших сочетаниях и от которой зависит, например, будет ли соль растворяться быстрее или медленнее с повышением температуры. Другая сила, которая была известна, — это взаимодействие на далеких расстояниях, вездесущее и незримое притяжение — изменяющееся обратно пропорционально квадрату расстояния и именуемое тяготением или *гравитацией*. Этот закон был известен и очень прост. Но *почему* вещи продолжают движение, если они движутся, или *отчего* существует закон тяготения — это было, конечно, неизвестно.

Описание природы — как раз то, что нас здесь интересует. С этой точки зрения, газ, да и вообще *любое* вещество, есть мириады движущихся частиц. Все то, что мы наблюдали, стоя на морском берегу, можно сразу объединить в единое целое. Во-первых, давление: оно возникает вследствие столкновений атомов с препятствиями, или с чем бы то ни было; медленное течение атомов, если все они в среднем движутся в одном направлении, есть ветер; *хаотичные* внутренние движения — это теплота. Есть волны избыточного давления, где собирается слишком много частиц, и потому они, устремляясь вперед, сдавливают другие частицы, и так далее. Эти волны избыточного давления есть *звук*. Понять все это было немаловажным достижением. (Некоторые из этих идей были изложены в предыдущей главе.)

Какие же *виды* частиц существуют? Тогда считалось, что их 92: ровно столько было известно различных видов атомов. Они имели различные наименования, связанные с их химическими свойствами.

Следующая проблема заключалась в том, *что такое силы близкого действия*. Почему атом углерода притягивает один или два атома кислорода, но не более? Каков механизм взаимодействия между атомами? Уж не тяготение ли это? Ответ был отрица-

тельным. Оно слишком слабо для этого. Но представьте себе силу, которая, подобно тяготению, тоже обратно пропорциональна квадрату расстояния, но несравнимо более мощную, плюс имеющую еще одно отличие. Тяготение — это всегда притяжение; но вообразите, что есть *два вида* «предметов», и что эта новая сила обладает таким свойством, что подобные *отталкиваются*, но различные *притягиваются*. Носитель этого сильного взаимодействия был назван *зарядом*.

В таком случае что мы имеем? Предположим, что у нас два разноименных заряда (плюс и минус) приложены очень тесно друг к другу. Допустим, что поодаль на некотором расстоянии есть еще один заряд. Будет ли между ними какое-то притяжение? *Практически никакого*, поскольку если первые два заряда равны, притяжение одного и отталкивание другого уравнивают друг друга. Значит, на заметных расстояниях сила незаметна. Но, с другой стороны, если мы *очень приблизим* этот лишний заряд, то возникнет *притяжение*, потому что отталкивание одноименных и притяжение разноименных будет стремиться сблизить разноименные и оттолкнуть дальше одноименные заряды. В итоге отталкивание будет *меньшим*, чем притяжение. По этой причине атомы, состоящие из положительных и отрицательных электрических зарядов, почти не взаимодействуют, когда они удалены друг от друга (если не считать силу гравитации). Когда же они тесно сближаются, они могут как бы «заглянуть внутрь» друг друга и перестроить свои заряды и взаимодействовать. В конечном итоге именно *электрическая* сила объясняет взаимодействие атомов. Поскольку эти силы столь велики, то в нормальном состоянии все плюсы и минусы вступают в связь настолько тесную, насколько это для них возможно. Все на свете, и даже мы сами, состоим из мельчайших, невероятно сильно взаимодействующих друг с другом положительно и отрицательно заряженных частиц, хорошо уравнивающих друг друга. Время от времени мы можем случайно соскрести несколько минусов или несколько плюсов (обычно легче отделить минусы), и тогда электрическая сила окажется в *неуравновешенном* состоянии и можно почувствовать действие электрического притяжения.

Чтобы представить себе, насколько силы электричества сильнее сил тяготения, расположим две песчинки, каждая размером в 1 миллиметр, на расстоянии 30 м друг от друга. Если взять только силы притяжения разноименных зарядов, не рас-

смаатривая силы отталкивания между одноименными, то какова будет сила притяжения между ними? Она будет равна *трем миллионам тонн*! Теперь понятно, почему малейший избыток или недостаток положительно или отрицательно заряженных частиц достаточен, чтобы произвести существенные электрические взаимодействия. Лишь по этой причине нет различия между заряженным и незаряженным телом ни по массе, ни по размеру — доля неуравновешенных зарядов слишком мала.

Зная это, легко представить устройство атома. Считалось, что у него в центре «ядро», имеющее положительный электрический заряд и очень массивное, оно окружено некоторым количеством «электронов», очень легких и отрицательно заряженных. Забегая немного вперед, отметим, что в самом ядре были обнаружены два вида частиц — протоны и нейтроны, почти одинаковые по весу и очень тяжелые. Протоны заряжены положительно, нейтроны не заряжены совсем. Если атом имеет ядро с шестью протонами, окруженное шестью электронами (отрицательно заряженные частицы в нашем обычном материальном мире все являются электронами, и они очень легки по сравнению с протонами и нейтронами, составляющими ядро), то этот атом будет стоять в химической таблице под номером 6 и называться углеродом. Атом с номером 8 называется кислородом, и так далее, потому что химические свойства зависят от количества электронов в атомной оболочке, точнее, лишь от того, сколько их там. Поэтому *химические* свойства вещества зависят только от номера в таблице — т. е. от числа электронов. (Весь список названий химических элементов можно было бы заменить на 1, 2, 3, 4, 5 и т. д. Вместо «углерод» мы могли бы говорить «элемент 6», имея в виду 6 электронов, но, конечно, когда элементы открывали, еще не было известно, что их можно пронумеровать таким образом, к тому же это усложнило бы работу с ними. Действительно лучше, чтобы у каждого элемента было собственное название, а не просто число.)

Затем нам стало известно еще больше об электрической силе. Естественно было бы истолкование электрического взаимодействия как притяжение двух предметов, положительно и отрицательно заряженных. Однако оказалось, что это неправильное истолкование. Более адекватно описывает ситуацию следующее: что наличие положительного заряда, в некотором смысле, искривляет пространство, создает «условие» для того, чтобы, когда появляется отрицательный заряд, он испытывал действие

силы. Эта возможность производить силу была названа *электрическим полем*. Когда электрон помещается в электрическое поле, говорят, что он «притягивается». При этом действуют два правила: а) заряд порождает поле и б) заряды, помещенные в поле, испытывают на себе действие сил, заставляющих их двигаться. Причина этого станет ясна, когда мы рассмотрим следующее явление: если мы электрически зарядим тело, скажем расческу, затем возьмем электрически заряженный кусочек бумаги и положим его на некотором расстоянии, то он будет реагировать на движение расчески, поворачиваясь всегда вслед за ним. Если мы начнем двигать гребнем быстрее, то скоро окажется, что бумажка немного отстает, то есть, существует *запаздывание* в действии силы. (Вначале, когда мы двигаем расческу сравнительно медленно, проявляется дополнительное обстоятельство, а именно *магнетизм*. Магнитные воздействия проявляются, когда *заряды движутся друг относительно друга*, так что магнитные и электрические силы могут оказаться проявлениями одного и того же поля, как две различные стороны одного и того же явления. Изменяющееся электрическое поле невозможно без магнетизма.) Чем дальше мы отодвигаем бумагу, тем больше оказывается запаздывание. Тут можно наблюдать интересный феномен: хотя сила между двумя зарядами должна уменьшаться пропорционально *квадрату* расстояния, оказалось, что при движении заряда влияние распространяется *гораздо дальше*, чем можно было ожидать. То есть, сила воздействия убывает медленнее, чем по закону обратных квадратов.

Можно привести аналогию: если в бассейне с водой плавает поплавок, то мы можем привести его в движение «непосредственно», бросив в воду поблизости другой поплавок. Если вы смотрели только на *поплавки*, все, что вам было видно, что один поплавок сместился в ответ на движение другого, т. е. между ними было некоторое «*взаимодействие*». Конечно, на самом-то деле мы взволновали *воду*, и тогда *вода* привела в движение второй поплавок. Можно было бы вывести «закон», что, если мы оказываем небольшое воздействие на воду, то поплавок, расположенный в воде в непосредственной близости, начнет двигаться. Если же он расположен на значительном расстоянии, то он едва покачнулся бы, потому что мы воздействуем на воду *один раз и в одном месте*. Но когда мы начинаем постоянно дергать поплавок, возникает новое явление: по воде побегут *волны*, так что колебательное воздействие поплавок распространяется на

гораздо большее расстояние. Поэтому представление о прямом взаимодействии нужно заменить присутствием воды или, для электрических зарядов, так называемым *электромагнитным полем*.

Электромагнитное поле может проводить волны; одни из этих волн — это *свет*, другие — *радиоволны*, но их общее наименование — *электромагнитные волны*. Эти волны имеют различные *частоты колебаний*, и это единственное, что отличает одну волну от другой. Если мы заставляем заряд двигаться туда-сюда все быстрее и быстрее, то, наблюдая, что получится, увидим различные эффекты, которые все характеризуются лишь одной величиной — количеством колебаний в секунду. Обычные помехи, которые дает электрический ток в проводках жилых зданий, имеет частоту около сотни колебаний в секунду. Если мы повысим частоту до 500–1000 килогерц (1 килогерц = 1000 герц), то окажемся «в эфире», потому что это те частоты, которые используются в радиовещании. (Конечно, *эфир* здесь не при чем!) Если мы еще больше увеличим частоту, то войдем в диапазон, используемый для УКВ и ТВ. Еще более короткие волны используются в *радиолокации*. Еще большая частота волн — и нам уже не нужен прибор, чтобы регистрировать их, они становятся видимыми человеческим глазом. В полосе частот от 5×10^{14} до 5×10^{15} колебаний в секунду наш глаз воспринял бы колебание заряженной расчески как красный, синий или фиолетовый свет, в зависимости от частоты. Частоты ниже этого диапазона называются инфракрасными, а выше — ультрафиолетовыми. То обстоятельство, что мы способны видеть на определенных частотах, не делает эту часть электромагнитного спектра более важной, но с человеческой точки зрения они, конечно, *действительно* более интересны. Если мы еще более повысим частоту, то получим рентгеновские лучи. Это не что иное, как свет более высокой частоты. Еще дальше пойдет гамма-излучение (табл. 2.1). Эти два термина — рентгеновское и гамма-излучение — почти одно и то же. Обычно электромагнитные волны, излучаемые ядрами, именуют гамма-излучением, а те, которые исходят от атомов, — рентгеновскими, но если их частота совпадает, то физически они неотличимы друг от друга, каков бы ни был их источник. Еще более высокие частоты, скажем, 10^{24} Гц, мы еще можем получать искусственно, например, на синхрофазотроне здесь, в Калтхе. Сейчас возможно обнаружить электромагнит-

ные волны немислимо высоких частот — больших еще на три порядка — среди волн так называемого *космического излучения*. Но эти волны нам пока не подвластны.

Таблица 2.1. Электромагнитный спектр

Частота, колебаний/с	Название	Приблизительное поведение
10^2	Электрические возмущения	Поле
$5 \times 10^5 - 10^6$	Радиовещание	Волны
10^8	FM—ТВ	
10^{10}	Радар	
$5 \times 10^{14} - 10^{15}$	Свет	
10^{18}	Рентгеновские лучи	Частицы
10^{21}	γ -лучи, ядерные	
10^{24}	γ -лучи, «искусственные»	
10^{27}	γ -лучи, в космических лучах	

Квантовая физика

Усвоив представление об электромагнитном поле и о том, что оно способно передавать волны, мы скоро обнаруживаем, что эти волны на самом деле ведут себя довольно странным образом, не свойственным для волн. При очень высоких частотах их поведение гораздо больше напоминает поведение *частиц*! Это странное обстоятельство объясняется в *квантовой механике*, которая возникла вскоре после 1920 года. Еще до этого представление о трехмерном пространстве и отдельно существующем времени было заменено Эйнштейном сначала на сочетание пространство-время, а затем на *искривленное* пространство-время, чтобы объяснить тяготение. То есть, «сцена» физических явлений превратилась теперь в пространство-время, а тяготение, по всей вероятности — это видоизмененное пространство-время. Тогда было также обнаружено, что законы движения частиц неверны. Механические законы «инерции» и «силы» — законы Ньютона — *непригодны* в мире атомов. Вместо этого оказалось, что объекты микромира ведут себя *совер-*

шенно иначе, чем объекты макромира. Именно это и делает физику очень трудной — и очень интересной. Трудной, потому что объекты микромира ведут себя так «неестественно». Их поведение противоречит нашему опыту, оно вообще ни на что не похоже, поэтому есть лишь один способ описать их поведение — аналитический. Он сложен и требует большого воображения.

В квантовой механике много особенностей. Во-первых, представление о том, что частица имеет определенное положение в пространстве и определенную скорость, больше не имеет силы. Иллюстрацией того, насколько неверны здесь представления классической физики, является правило, что невозможно знать одновременно, где находится частица и с какой скоростью она движется. Неопределенность в импульсе и неопределенность в положении дополняют друг друга: их произведение постоянно. Можно записать этот закон примерно так: $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$, но подробнее мы объясним это позже. Это правило объясняет очень таинственный парадокс: если атомы состоят из положительных и отрицательных зарядов, то почему отрицательный заряд просто не пристыкуется к положительному (они ведь притягиваются), сблизившись настолько, что они полностью погасят друг друга? *Почему атомы такие большие?* Почему ядро находится в центре, а электроны — вокруг него? Сначала объясняли это тем, что ядро так велико. Но ведь это не так, ядро *очень мало*. Диаметр атома равен примерно 10^{-8} см, а ядра — около 10^{-13} см. Если вы возьмете атом и захотите увидеть его ядро, то вам придется увеличить его до размеров большой комнаты, и даже тогда ядро будет еле заметной точкой, но при этом *вес атома почти полностью* заключен в этом бесконечно малом *ядре*. Что мешает электронам просто упасть на ядро? Именно из-за принципа неопределенности: если бы они упали на ядро, мы знали бы их положение с очень большой точностью, и они должны были бы иметь *очень большой* (но неопределенный) импульс, то есть, огромную *кинетическую энергию*. Обладая такой энергией, они бы оторвались от ядра. Они предпочитают компромисс: оставляя себе сравнительно небольшой простор для неопределенности, они колеблются вокруг ядра с некоторым минимальным запасом движения, согласно этому правилу. (Помните, мы говорили, что атомы кристалла, охлажденного до абсолютного нуля, не перестают двигаться, они все еще колеблются. Если они остановятся, то мы будем знать одновременно и где они находятся, и то, что их скорость равна нулю, а это нарушение принципа неопределен-

ности. Мы не можем знать, где они и какова их скорость, поэтому они не должны сидеть на месте!)

Другое интереснейшее изменение в представлениях и философии науки, осуществленное квантовой механикой, заключается в следующем: невозможно *точно* предсказать, что произойдет в каких-то обстоятельствах. Например, можно выделить атом, который способен излучать свет, и можно зарегистрировать испущенный фотон, о чем мы кратко скажем позже. Однако невозможно предсказать, *когда именно* атом собирается испустить свет, или, если атомов несколько, *какой именно* из атомов сделает это первым. Вы можете сказать, что в атомах есть некие внутренние «колесики», которые мы еще не рассмотрели достаточно хорошо. Нет, внутренних колесиков *нет*; природа, насколько мы ее сегодня понимаем, ведет себя таким образом, что *принципиально невозможно* сделать точное предсказание о том, каков *в точности* будет исход эксперимента. Это ужасно! Действительно, философы раньше учили, что один из главных критериев науки — это требование, чтобы в одинаковых условиях всегда происходили одни и те же события. Но и это попросту *неверно*, это *не является* основным условием науки. На самом деле никакое событие не повторяется одинаково, и мы можем предсказать его лишь статистически, только в среднем. Тем не менее, это не привело к полному краху науки.

Философы, между прочим, много рассуждают о том, что *абсолютно необходимо* для науки, и это всегда оказывается, насколько можно судить, либо наивным, либо попросту ложным. Например, некоторые философы называли существенным принципом науки, что, если один и тот же эксперимент проводится, скажем, в Стокгольме и в Киото, *результаты* должны быть *те же самые*. Это совершенно неверно. Для науки это не обязательно; *на опыте* может оказаться и так, но не всегда. Например, если опыт заключается в том, чтобы выглянуть в окно и наблюдать северное сияние в Стокгольме, то в Киото вы его не увидите; это различные явления. «Но, — скажете вы, — здесь идет речь о чем-то внешнем; а вы закройте в маленькой комнате и плотно задерните шторы — будет ли тогда какая-то разница?» Конечно. Если взять маятник на шаровом шарнире, отвести его и отпустить, то в Стокгольме плоскость колебаний маятника будет постепенно меняться, а в Киото — нет, хотя шторы и там, и там опущены. И это вовсе не приводит к крушению науки. Ка-

кова на самом деле основополагающая гипотеза науки, ее фундаментальная философия? Мы установили ее в первой главе: *единственный критерий истинности всякой идеи — это эксперимент*. Если окажется, что большинство экспериментов в Киото приведут к тем же результатам, что и в Стокгольме, тогда на основе этого «большинства экспериментов» будет сформулирован общий закон, а о тех экспериментах, которые не дали одинаковых результатов, мы скажем, что на них повлиял характер местности в районе Стокгольма. Мы придумаем какой-нибудь способ обобщить результаты экспериментов, и нам не нужно знать заранее, как именно мы это сделаем. Если нам говорят, что одни и те же эксперименты приводят всегда к одному и тому же результату, что ж, очень хорошо, но если мы пробуем, и *не выходит*, ну что ж, значит, *не выходит*. Мы должны просто отталкиваться от того, что мы видим, а потом формулировать остальные свои идеи на основе нашего опыта.

Возвращаясь снова к квантовой механике и к основам физики, сейчас мы, конечно, не можем подробно рассматривать квантово-механические принципы, потому что понять их очень непросто. Просто примем, что они есть, и рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из них. Одно из них таково: то, что мы раньше рассматривали как волны, может вести себя подобно частицам, а частицы — подобно волнам; на самом деле, нет никакого различия между волной и частицей. Таким образом квантовая механика *объединяет* представление о поле с волнами в нем и частицами воедино. При низких частотах волновые свойства более очевидны, поэтому оказываются более полезными для приблизительного описания в образах повседневного опыта. Но с возрастанием частоты, через приборы, которыми мы обычно производим измерения, проходит не волна, а частица. На самом деле, хотя мы говорим о высоких частотах, волновые явления заметить уже нельзя, если частота колебаний выше 10^{12} колебаний в секунду. Мы только *приходим к выводу* о наличии высокой частоты, зная энергию частиц и предполагая истинность представлений квантовой механики о частице-волне.

Так мы получаем и новое видение электромагнитных взаимодействий. Теперь мы можем добавить к электрону, протону и нейтрону новую *частицу*. Эта новая частица называется *фотон*. Новое воззрение на взаимодействие между электронами и протонами — электромагнитная теория, но со всеми уточнениями,

внесенными квантовой механикой, называется *квантовой электродинамикой*. Эта фундаментальная теория о взаимодействии света и вещества, или электрического поля и зарядов, на данный момент является крупнейшим успехом в физике. Из одной этой теории мы можем вывести основные правила для всех обычных явлений, кроме тяготения и внутриядерных процессов. Например, из квантовой электродинамики выводятся все известные электрические, механические и химические законы; законы столкновения бильярдных шаров, движения проводников в магнитном поле, удельная теплоемкость угарного газа, цвета неоновых огней, плотность соли, реакция образования воды, — все они являются следствиями этого одного закона. Все эти задачи можно решить, если условия, в которых протекает явление, достаточно просты, чтобы можно было использовать приближение. На самом деле это почти никогда не случается, но все же часто мы более или менее понимаем, что происходит. На данный момент не найдено никаких исключений для квантовой электродинамики за пределами ядра, и даже внутри ядра мы не можем говорить об исключениях, потому что мы просто не знаем, что там происходит.

Далее, квантовая электродинамика — в принципе это теория всей химии, всех жизненных процессов, если жизнь сводится к химии, а, следовательно, и к физике, потому что химия уже сведена к физике (та часть физики, которая отвечает за химические процессы, уже известна). Более того, та же квантовая электродинамика, эта изумительная теория, предсказывает много новых явлений. Во-первых, она показывает свойства фотонов очень высоких энергий, гамма-лучей и т. д. Она предсказала также еще одно немаловажное явление: наряду с электроном должна существовать также другая частица с той же массой, но с противоположным зарядом, названная *позитроном*, и обе они, встречаясь, могут истребить друг друга, излучив при этом свет или гамма-кванты. (В конечном счете, свет и гамма-лучи — одно и то же, просто они занимают различные точки на шкале частот.)

Обобщение правила, что у каждой частицы должна быть своя античастица, оказалось истинным. Античастица электрона называется позитрон, для других частиц название античастицы получается просто добавлением «анти» к названию частицы, например, антипротон или антинейтрон. В квантовой электродинамике исходными являются два числа, и предполагается,

что все остальные числа можно вывести из них. Эти два числа — масса электрона и его заряд. На самом деле, это не совсем так, потому что существует целая совокупность чисел химической таблицы, которые говорят о весе ядер. Это ведет нас к следующей части темы.

Ядра и частицы

Из чего состоят ядра, и что удерживает их части вместе? Было обнаружено, что внутри ядра связаны невероятно мощными силами. Когда эти силы высвобождаются, выделяемая энергия по сравнению с химической энергией огромна, все равно, что сравнить взрыв атомной бомбы со взрывом тротила. Это объясняется тем, что атомная бомба использует внутриядерные силы, тогда как взрыв тротила — изменения электронов во внешних оболочках атома. Вопрос в том, что за силы удерживают вместе протоны и нейтроны в ядрах? Юкава предположил, что, подобно тому как электрическое взаимодействие может быть связано с частицей, фотоном, так внутриядерные силы образуют некоторое поле, а колебания этого поля ведут себя как частицы. Таким образом, в мире могут существовать другие частицы, кроме протона и нейтрона, и Юкава смог вывести свойства этих частиц из уже известных характеристик ядерных сил. Например, он предсказал, что они должны иметь массу в 200–300 раз большую массы электрона; и вот, представьте себе, в космическом излучении были открыты частицы точно такой массы! Правда, впоследствии оказалось, что это совсем не те частицы. Они были названы μ -мезонами, или мюонами.

Однако чуть позже, в 1947 или 1948 гг., была открыта другая частица, π -мезон, или пион, которая соответствовала критериям Юкавы. Выходит, чтобы получить внутриядерные силы, мы должны к протону и нейтрону добавить еще и пионы. Теперь вы могли бы воскликнуть: «Как здорово! При помощи этой теории мы построим квантовую ядродинамику, используя пионы именно так, как предполагал Юкава, и если эта теория будет работать, то можно будет объяснить все». На этот раз не повезло. Оказалось, что эта теория требует таких сложнейших вычислений, что никто до сих пор не смог точно установить, каковы практические следствия из этой теории, тем более — проверить их экспериментально, и эта работа продолжается уже почти 20 лет! Так что мы увязли в теории, и мы не знаем, верна она или

нет; впрочем, мы знаем, что она *отчасти* неверна, что в ней чего-то недостает. Пока мы топтались вокруг теории, пытаясь вычислить, каковы должны быть следствия из этой теории, экспериментаторы открывали кое-что новое. Например, они открыли эти μ -мезоны, или мюоны, и мы до сих пор не знаем, на что они годятся. Кроме того, в космическом излучении было открыто множество «лишних» частиц. На сегодняшний день оказывается, что нам известно свыше 30 частиц, и очень трудно понять связь между ними, для чего они нужны природе и кто из них от кого зависит. Сегодня эти частицы не предстают как различные проявления единого целого, и то обстоятельство, что у нас столько не связанных между собой частиц, означает просто, что у нас слишком много бессвязной информации и нет хорошей теории для ее объяснения. После огромных успехов квантовой электродинамики у нас появился набор сведений из ядерной физики, но эти знания довольно обрывочны, нечто, состоящее наполовину из эксперимента, наполовину из теории. Предполагается, что между протонами и нейтронами существует некоторого рода взаимодействие, и вычисляется, каковы могли бы быть его следствия, но мы не понимаем толком, откуда берутся эти силы. А в остальном мы продвинулись совсем немного.

У нас набралось огромное количество химических элементов, и внезапно между ними нам удалось увидеть связь, выраженную в периодической системе Менделеева. Например, натрий и калий — вещества, близкие по своим химическим свойствам, и находятся в одном и том же столбце таблицы Менделеева. Мы пытались найти что-то подобное периодической таблице для новых частиц. Одна такая таблица для новых частиц была предложена независимо друг от друга Гелл-Маном в США и Нишиджимой в Японии. Основой их классификации стало новое число, наподобие электрического заряда. Оно присваивается каждой частице и называется «странность», S . Это число (подобно электрическому заряду) сохраняется неизменным в реакциях, производимых ядерными силами.

В таблице 2.2 перечислены все частицы. На данном этапе мы не можем подробно рассматривать их, но эта таблица, по крайней мере, показывает вам, как много мы знаем. Под каждой частицей написана ее масса в определенных единицах, которые называются мегаэлектронвольт, или $MэВ$. ($MэВ$ равняется $1,782 \times 10^{-27}$ г.) Причина, почему была избрана именно эта единица измерения, чисто историческая, и мы не будем сейчас в

Таблица 2.2. Элементарные частицы

Масса, ГэВ	Заряд 0	Группы и странность	
$-e$	$+e$		
1,4	$\underline{Y_1^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-}$	$\underline{Y_1^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0}$	$\underline{Y_1^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+}$ 1395
1,3	$\underline{\Xi^-}$ 1319	$\underline{\Xi^0}$ 1311	
1,2	$\underline{\Sigma^-}$ 1196	$\underline{\Sigma^0}$ 1191	$\underline{\Sigma^+}$ 1189
1,1		$\underline{\Lambda^0}$ 1115	
1,0		$\underline{n}$ 939	$\underline{p}$ 938
0,9			
0,8		$\underline{\omega^0 \rightarrow \pi + \pi + \pi}$	
0,7	$\underline{\rho^- \rightarrow \pi + \pi}$	$\underline{\rho^0 \rightarrow \pi + \pi}$	$\underline{\rho^+ \rightarrow \pi + \pi}$
0,6			
0,5	$\underline{K^-}$ 494	$\underline{K^0 \bar{K}^0}$ 498	$\underline{K^+}$ 494
0,4			
0,3			
0,2	$\underline{\pi^-}$ 139,6	$\underline{\pi^0}$ 135,0	$\underline{\pi^+}$ 139,6
0,1	$\underline{\mu^-}$ 105,6		
0	$\underline{e^-}$ 0,51	$\underline{\nu^0}$ 0	

Барионы

Мезоны

Лептоны

это вдаваться. Частицы с большей массой помещены вверху таблицы; видно, что протон и нейтрон имеют почти одинаковую массу. В вертикальных столбцах помещены частицы с одинаковым электрическим зарядом, все нейтральные — посередине, положительно заряженные — справа от него, все отрицательно заряженные — слева.

Частицы подчеркнуты сплошной линией, «резонансы» — пунктирной. Несколько частиц не вошли в таблицу. Среди них очень важные частицы с нулевым зарядом и массой — фотон и гравитон (они не вписываются в барион-мезон-лептонную схему классификации), так же как некоторые недавно открытые резонансы (K^* , ϕ , η). Античастицы мезонов приведены в таблице, но античастицы лептонов и барионов пришлось бы представить в другой таблице, которая выглядела бы почти точно так же, лишь в зеркальном отражении относительно нулевой колонки. Хотя все частицы, за исключением электрона, нейтрино, фотона, гравитона и протона, нестабильны, продукты их распада показаны только для резонансов. Понятие странности к лептонам неприменимо, потому что они не вступают в сильное взаимодействие с ядрами.

Все частицы, стоящие вместе с нейтронами и протонами, носят название *барионы*. Это «лямбда», с массой 1154 МэВ, и еще три под названием «сигма», называемые сигма-минус, сигма-нуль, сигма-плюс, с почти одинаковыми массами. Группы частиц с массами, отличающимися на 1–2%, называются мультиплетам. У всех частиц, входящих в мультиплет, одинаковая странность. Первый мультиплет — это протон-нейтронная пара (дублет), затем идет синглет (одиночка) лямбда, затем триплет (тройка) сигм и, наконец, дублет кси и синглет омега-минус. Со всем недавно, в 1961 г., было открыто и еще несколько тяжелых частиц. Да и вообще, *частицы ли это?* Они живут такое короткое время (распадаются, едва возникнув, на Λ и π), что мы не знаем, рассматривать ли их как новые частицы, или как некоторый вид «резонансных» взаимодействий между Λ и π при некоторой фиксированной энергии.

Помимо барионов, существуют другие частицы, участвующие в ядерных взаимодействиях — *мезоны*. Во-первых, это три разновидности пионов (плюс, нуль и минус), они образуют новый триплет. Найдены также новые частицы, получившие название *K-мезонов*, они образуют дублет, K^+ и K^0 . И здесь также каждая частица имеет свою античастицу, если только она *сама*

не является своей античастицей. Например, π^- и π^+ — античастицы, но π^0 — сама себе античастица. K^- и K^+ — античастицы, так же как K^0 и $\bar{K}^0$. Кроме того, в 1961 г. мы обнаружили также еще некоторые мезоны или *вроде-мезоны*, которые распадаются почти мгновенно. Диковина под названием ω , распадающаяся на три пиона, имеет массу 780 по этой шкале; и существует нечто менее определенное, распадающееся на два пиона. Эти частицы, называемые мезонами и барионами, и античастицы мезонов представлены в той же таблице, но античастицы барионов нужно поместить в другую таблицу, «зеркальное отражение» первой относительно столбца нулевого заряда.

Точно так же, как очень удачная таблица Менделеева в конце имела «хвост» выпадающих из нее редкоземельных элементов, так и у нас некоторые частицы не умещаются в эту таблицу. Это те частицы, которые с ядрами сильно не взаимодействуют, никак не связаны с ядерными взаимодействиями и между ними также нет сильного взаимодействия (я имею в виду огромной мощности тип взаимодействия, дающий ядерную энергию). Эти частицы называются лептонами. Среди них — электрон, имеющий по этой шкале очень маленькую массу, всего лишь 0,510 МэВ. Затем идет μ -мезон, или мюон, с массой в 206 раз большей массы электрона. Насколько мы можем судить из экспериментов, вся разница между электроном и мюоном заключается в их массе. Все свойства мюона, все взаимодействия ничем не отличаются от свойств электрона — только один тяжелее другого. Почему существует еще одна такая частица, как электрон, только более тяжелая, и для чего она предназначена? Мы не знаем. Вдобавок есть еще нейтральный лептон — нейтрино с нулевой массой. На самом деле, сейчас уже известно, что есть *два* различных вида нейтрино, один, связанный с электронами, и другой — с мюонами.

И, наконец, существуют еще две частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях с ядерными частицами: одна из них — фотон и, если поле тяготения аналогично квантовомеханическому (квантовая теория тяготения еще не разработана), то, возможно, существует еще одна частица с нулевой массой, гравитон.

Что значит «нулевая масса»? Массы, приведенные здесь, это массы *покоящихся* частиц. Тот факт, что частица имеет нулевую массу покоя, значит, между прочим, что она не может *нахо-*

даться в состоянии покоя. Фотон никогда не стоит на месте, он движется со скоростью 300 000 км/с. Мы сможем лучше понять, что означает понятие массы, когда разберемся в теории относительности.

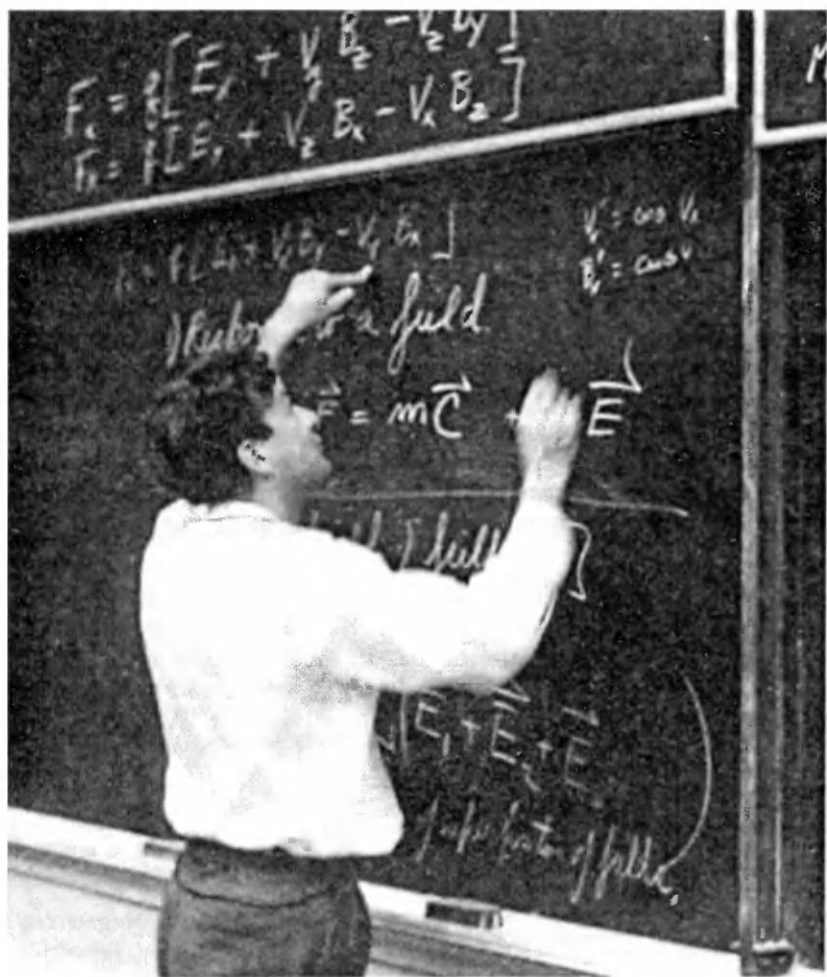
Таким образом, перед нами огромное количество частиц, которые все вместе, по-видимому, образуют фундаментальные составляющие части вещества. К счастью, не все эти частицы отличаются по своим взаимодействиям друг от друга. На самом деле, как сейчас представляется, существуют только *четыре типа* взаимодействий между частицами. Если расположить их в порядке убывания, то получим: ядерные силы, электрические взаимодействия, β -распадное взаимодействие и тяготение. Фотон взаимодействует со всеми заряженными частицами, причем сила взаимодействия определяется некоторым постоянным числом, а именно $1/137$. Закон, детально описывающий это взаимодействие, известен — это квантовая электродинамика. Тяготение взаимодействует с любой энергией, но сила этого взаимодействия ничтожно мала, намного слабее, чем электричество. Этот закон также известен. Затем следуют так называемые слабые распады — β -распад, в ходе которого относительно медленно нейтрон распадается на протон, электрон и нейтрино. Этот закон выяснен лишь отчасти. Так называемое сильное взаимодействие (мезон-барионное взаимодействие) обладает по этой шкале силой, равной 1, и закон для него совершенно неизвестен, хотя известен ряд правил, например, что число барионов остается неизменным во всех реакциях.

Таблица 2.3. Элементарные взаимодействия

Взаимодействие	Сила*	Закон
Фотоны с заряженными частицами	$\sim 10^{-2}$	Закон известен
Гравитация со всякой энергией	$\sim 10^{-40}$	Закон известен
Слабые распады	$\sim 10^{-5}$	Закон отчасти известен
Мезоны с барионами	~ 1	Закон неизвестен (известны некоторые правила)

* Сила — безразмерная величина константы связи, проявляющаяся в каждом взаимодействии ($\sim$ значит «примерно»).

Вот в таком ужасном состоянии находится сейчас физика. Чтобы подвести итог, я могу сказать следующее: вне ядра мы, похоже, знаем все; внутри ядра квантовая электродинамика также работает — мы не обнаружили таких случаев, где бы она была опровергнута. Ареной, на которой действуют наши знания, можно считать релятивистское пространство-время, возможно, с включенным в него тяготением. Мы не знаем, каково было начало Вселенной, мы ни разу не ставили опытов с целью проверки, насколько точны наши представления о пространстве-времени на малых расстояниях; все, что мы *знаем*, — что наши представления верны вне этих расстояний. Следует также добавить, что правилами этой игры являются принципы квантовой механики, и что эти принципы применимы, насколько мы можем судить, как к уже известным частицам, так и к вновь открываемым. Поиски происхождения ядерных сил приводят нас к новым частицам, в то время как у нас нет полного понимания их взаимных отношений, хотя мы уже знаем, что между ними существуют некоторые удивительные взаимодействия. По-видимому, мы постепенно нащупываем путь к пониманию мира заатомных частиц, но неизвестно, насколько далеко нам еще предстоит идти для достижения этой цели.



3

Отношение физики к другим наукам

Введение

Физика — самая фундаментальная и всеобъемлющая из всех наук, она оказала глубокое влияние на все развитие науки. На самом деле, физика — современный эквивалент той давнишней *натурфилософии*, из которой выросло большинство современных наук. Исследователи во многих областях вдруг обнаруживают, что занимаются физикой, вследствие той основополагающей роли, которую она играет во всех явлениях.

В этой главе мы попытаемся рассказать о фундаментальных проблемах, которые встают перед соседними науками, хотя, конечно, в такой маленькой главе невозможно почувствовать всю их сложность, тонкость и красоту. Недостаток места также не позволяет нам остановиться на связи физики с техникой, промышленностью, общественной жизнью, проблемами войны, и даже на столь немаловажной проблеме взаимоотношений между физикой и математикой. (Математика, с нашей точки зрения, не наука в том смысле, что она не относится к *естественным* наукам. Критерием ее истинности не является опыт.) Не всё то, что не наука, уж обязательно плохо. Например, любовь не наука. Так что, когда мы говорим, что нечто не является наукой, это не значит, что здесь что-то неладно, — это не наука, только и всего.

Химия

Наука, которая подверглась самому глубокому влиянию физики, — это химия. Исторически сложилось так, что в ранний период своего развития химия занималась почти исключительно тем, что сегодня называется неорганической химией, т. е.

химией веществ, не связанных с живыми телами. Потребовалась огромная аналитическая работа, чтобы открыть многие элементы и выявить их связь друг с другом — каким образом они образуют относительно простые соединения, составляющие камни, землю и т. д. Химия на этом этапе сыграла очень важную роль в становлении физики. Взаимодействие между двумя науками было очень существенным, поскольку атомная теория основывалась в значительной степени на химических опытах. Теорию химии, то есть теорию самих реакций, подытожила периодическая система Менделеева, из которой вытекали многие необычные связи между различными элементами. В этой таблице собраны все правила, определяющие, из чего и как образуется вещество, они и составили неорганическую химию. Все эти правила, в конце концов, получили свое объяснение в квантовой механике. Так что теоретическая химия — это, на самом деле, физика. Однако объяснение, даваемое квантовой механикой, — это объяснение только *в принципе*. Мы уже говорили о разнице между знанием правил игры в шахматы и умением играть. Так и здесь — мы знаем правила, но играем не очень-то хорошо. Оказывается очень сложно предсказать точный результат определенной химической реакции. Тем не менее, в самых глубинах теоретической химии лежит квантовая механика.

Существует также раздел физики и химии, который был разработан обеими науками совместно, и который чрезвычайно важен. Это метод статистики, применяемый к тем случаям, когда действуют законы механики, т. е. *статистической механики*. В любой химической реакции действует много атомов, а мы уже знаем, что все атомы двигаются очень непредсказуемым и сложным образом. Если бы мы могли проанализировать каждое столкновение и проследить движение каждой молекулы, то могли бы узнать, каков будет результат, но количество информации, необходимой, чтобы отметить путь всех этих молекул, настолько превосходит возможности любого компьютера, и уж, конечно, человеческого мозга, что потребовалось разработать метод для разрешения подобных сложных ситуаций. Кроме этого, статистическая механика лежит в основе тепловых явлений, или термодинамики.

Неорганическая химия как наука сейчас сведена в основном к физической химии и квантовой химии. Физическая химия изучает скорости химических реакций и детали этих процессов (как именно молекулы соударяются, какая часть молекулы ото-

рвется первой и т. д.), а квантовая химия помогает нам понять происходящее на языке физических законов.

Другой раздел химии — *органическая химия*, химия веществ, участвующих в процессах жизнедеятельности. Долгое время считалось, что вещества, составляющие живое, настолько необыкновенны, что их невозможно произвести искусственно из неорганических материалов. Но это оказалось не так — органические вещества отличаются от неорганических большей сложностью расположения атомов. Органическая химия, конечно же, теснейшим образом связана с биологией, которая поставляет ей вещества, и с промышленностью. Кроме того, многое из физической химии и квантовой механики в значительной степени может быть применено к органическим соединениям, также как к неорганическим. Однако главные проблемы органической химии вовсе не в этом, а в анализе и синтезе веществ, образуемых в биологических системах, в живых телах. Это ведет незаметно, шаг за шагом, к биохимии, а затем и к самой биологии, т. е. к молекулярной биологии.

Биология

Таким образом, мы пришли к науке *биологии*, которая изучает живое. В начале ее развития биологи должны были решать чисто описательные задачи, *каковы* живые существа. Так что им приходилось просто считать волоски на ножках у блохи и т. д. Разобравшись с описаниями (что было очень интересно), биологи перешли к выяснению *механизмов* внутри живых тел, поначалу, естественно, очень приблизительно, потому что проникнуть в более тонкие детали было непросто.

В то время существовала интересная связь между физикой и биологией: именно биология помогла физике открыть *закон сохранения энергии*, который был впервые установлен Майером при изучении количества тепла, поглощаемого и выделяемого живыми организмами.

Если взглянуть на процессы биологии живых организмов более пристально, можно увидеть *многие* физические явления: циркуляцию крови, пульс, давление и т. д. Возьмем, к примеру, нервы: мы знаем, что происходит, когда мы наступаем на острый камень, и что каким-то образом информация от ноги поднимается вверх. Интересно, как это происходит? Изучая нервы, биологи пришли к выводу, что это очень нежные тру-

бочки со сложными и очень тонкими стенками. Через эти стенки клетка закачивает ионы, так что с их наружной стороны накапливаются положительные ионы, а с внутренней — отрицательные, как в конденсаторе. И вот, у этой мембраны есть очень интересное свойство: если она «разряжается» в одном месте, то есть там ионы смогли пройти насквозь, вследствие чего напряжение там понизилось, это электрическое воздействие сказывается на соседних ионах, воздействуя на мембрану таким образом, что ионы могут проникать сквозь нее и в соседних местах. Этот процесс повторяется, и возникает некая волна «проницаемости» мембраны, бегущая вдоль нервного волокна, если один конец его получает «возбуждение», когда, например, нога наступает на острый камень. Эта волна словно длинная цепочка костяшек домино, поставленных вертикально; если крайнюю толкнуть, она толкнет следующую, и т. д. Конечно, больше одного сообщения так не передать, пока домино не расставят, как прежде. Так и в живой клетке постоянно идут процессы медленного накопления ионов и подготовка нерва к передаче следующего импульса. Это позволяет нам узнать, что мы делаем (или, по крайней мере, где мы находимся). Естественно, электрические явления, связанные с таким нервным импульсом, можно зафиксировать с помощью электрических инструментов, и поскольку такие электрические явления *существуют*, то без физики электричества нельзя понять поведомость по нерву.

Обратный процесс имеет место, когда по нерву посылается сообщение из мозга. Что происходит на конце нерва? Здесь нерв разветвляется на несколько миниатюрных концевых ответвлений, которые связаны с мышечной структурой. По причинам пока не вполне понятным, когда импульс достигает концевого ответвления, из него выстреливаются микроскопические порции вещества, называемого ацетилхолин (5 или 10 молекул за один раз). Эти молекулы воздействуют на мышечное волокно, и оно сокращается — как просто! Но что же заставляет мышцу сокращаться? Мышца — это очень большое количество волокон, тесно прилегающих друг к другу, содержащих два различных вещества, миозин и актомиозин, но механизм, при помощи которого химическая реакция, вызванная ацетилхолином, влияет на размер молекулы, пока не ясен. Таким образом, основные процессы в мускулах, ответственные за механическое движение, неизвестны.

Биология — такое широкое поле деятельности, что есть множество проблем, о которых мы даже не упоминаем, например, как осуществляется зрение (что происходит со светом в глазу?), каков механизм слуха и проч. (Каким образом мы *мыслим*, будет обсуждаться позже в разделе психология.) Так вот, все эти вопросы, стоящие перед биологией, не являются на самом деле основополагающими. Даже зная все это, мы все еще будем далеки от понимания сущности жизни. Например, люди, изучающие нервы, понимают, что их работа очень важна, потому что, в конце концов, невозможно представить себе животных без нервов. Но *жизнь без нервов возможна*. У растений нет ни нервов, ни мышц, но они и без них прекрасно живут и растут. Так что фундаментальные проблемы биологии следует искать глубже; при этом мы обнаруживаем, что существует очень много свойств, общих для всего живого. Самая общая черта — то, что создания живой природы состоят из *клеток*, внутри каждой из которых действует сложный механизм химических процессов. В растительных клетках, например, работает механизм поглощения света и выработки сахарозы, которая поглощается в темноте, поддерживая жизнь растения. Когда растение съедается животным, сахароза производит в животном цепь химических реакций, тесно связанных с фотосинтезом растений (и противоположным процессом в темноте).

В клетках живых организмов происходит множество очень сложных химических реакций: одно соединение превращается в другое, то — в третье, и т. д. Рис. 3.1 дает некоторое представление о той огромной работе, которая была проделана в биохимии, там сведены наши современные знания лишь об одной малой части огромного ряда реакций, происходящих в клетках, возможно, 1% или около того.

Здесь мы видим, как молекулы претерпевают превращения, причем этот процесс разбит на множество этапов. Это — цикл Кребса, или дыхательный цикл. Каждое из химических веществ и каждый этап в нем по отдельности довольно просты, судя по изменениям в молекуле. Но — и это открытие ключевой важности в биохимии — эти изменения *относительно трудно воспроизвести в лабораторных условиях*. Если у нас имеются два сходных вещества, то одно из них не превращается просто так в другое, потому что между ними существует своеобразный энергетический барьер, или «стена». Посудите сами: если нам нужно переместить объект с одного места на другое на том же



Рис. 3.1. Цикл Кребса

энергетическом уровне, но по другую сторону «стены», нам придется поднять его над этой стеной, но это потребует затраты дополнительной энергии. Таким образом, большинство химических реакций не происходят, потому что для их начала требуется определенная энергия активации. Чтобы добавить еще один атом к химическому соединению, мы должны достаточно *приблизить* его, чтобы могла произойти нужная перестановка. В противном случае он пройдет часть пути вверх по «стене» и «свалится» назад. Однако если бы мы могли буквально взять каждую молекулу в руки и раздвинуть ее атомы таким образом, чтобы впустить новый атом, а потом отпустить, чтобы молекула захлопнулась уже вместе с ним — тогда мы нашли бы другой путь, *вокруг* стены, который не требовал бы столько энергии, и реакция могла бы идти с легкостью. Так вот, в клетках действительно есть очень большие молекулы, гораздо

больше тех, превращения которых мы только что описывали, и эти большие молекулы неким сложным образом умеют расставлять маленькие именно так, что реакция может происходить без затруднений. Эти очень большие и сложные молекулы называются *ферментами* (сначала их называли закваской, потому что впервые они были обнаружены при сбраживании сахара. Кстати, некоторые из реакций цикла Кребса были открыты при сбраживании сахара). Реакция будет идти в присутствии фермента.

Фермент состоит из особого вещества — *белка*. Молекулы ферментов очень большие и сложные, каждая из них неповторима, будучи предназначена для контроля над определенной реакцией. На рис. 3.1 рядом с каждой реакцией написано имя соответствующего фермента (иногда один фермент контролирует две реакции). Надо подчеркнуть, что сам фермент в реакции непосредственно не участвует. Он не изменяется; он просто позволяет атому перейти из одного положения в другое. После этого фермент сразу же готов проделать это с другой молекулой, как станок на фабрике, причем ему нужен запас нужных атомов и возможность избавляться от ненужных. Возьмем, к примеру, водород: существуют ферменты, на которых есть специальные ячейки для переноски водорода в любых химических реакциях. Например, на различных стадиях цикла имеются три или четыре фермента, которые используются для снижения количества водорода. Интересно, что механизм, посредством которого водород высвобождается в одном месте, в другом месте будет служить для связывания и использования водорода.

Наиболее важная черта цикла на рис. 3.1 — преобразование ГДФ в ГТФ (гуаназиндифосфат в гуаназинтрифосфат), потому что второе вещество содержит в себе гораздо больше энергии, чем первое. Точно так же, как у некоторых ферментов имеются «ящики» для переноса атомов водорода, так есть и специальные «ящики» для переноса *энергии*: в них входит трифосфатная группа. ГТФ несет в себе больше энергии, чем ГДФ, и если цикл идет в одном направлении, то создаются молекулы, содержащие избыточную энергию; они могут использоваться в другом цикле, *требующем расхода* энергии, например, в цикле сокращения мышцы. Мышца не сможет сокращаться в отсутствие ГТФ. Мы можем взять мышечное волокно, поместить его в воду, добавить ГТФ, и, если присутствуют нужные ферменты, волокно сократится. Так что сокращение мышцы есть превращение ГДФ

в ГТФ. В темноте молекулы ГТФ, накопленные в течение дня, используются, чтобы пустить цикл в обратном направлении. Ферменту, как видите, все равно, в каком направлении идет реакция, потому что в противном случае это нарушало бы один из законов физики.

Физика очень важна для биологии и для других наук еще и по другой причине — это *техника эксперимента*. Например, если бы не огромное развитие экспериментальной физики, то нарисованная схема сегодня не была бы известна. Дело в том, что самый эффективный способ анализа этих сложнейших систем — *пометить* атомы, использующиеся в реакции. Таким образом, если бы нам удалось включить в этот цикл какую-то молекулу углекислоты с «зеленой меткой» на ней, а потом посмотреть, где эта метка окажется через 3 секунды, затем через 10 с и т. д. — мы могли бы проследить весь ход реакции. Что это за «зеленая метка»? Это различные *изотопы*. Напомним, что химические свойства атомов определяются числом *электронов*, а не массой ядра. Но в атоме углерода, например, может быть 6 или 7 нейтронов, вдобавок к 6 протонам, которые имеются в каждом ядре углерода. С химической точки зрения, два атома C^{12} и C^{13} не отличаются, но по массе и ядерным свойствам они различны, поэтому их можно отличить друг от друга. Используя эти изотопы различного веса, можно проследить ход реакций. Еще лучше для этого радиоактивный изотоп C^{14} , который дает еще более осязаемое средство для отслеживания очень небольших количеств атомов.

Теперь возвращаемся к описанию ферментов и белков. Не все белки — ферменты, но все ферменты — белки. Существует множество белков, таких как белки мышц, структурные белки, входящие, например, в хрящевые ткани, кожу, не являющиеся ферментами. Однако без белков практически невозможна жизнь: во-первых, это составная часть всех ферментов, и во-вторых, составная часть многих живых веществ. У белков очень интересная и простая структура. Это ряд, или цепь, различных *аминокислот*. Существуют двадцать различных аминокислот, и все они могут сочетаться друг с другом, образуя цепи, костяком которых является группа $CO-NH$, и т. п. Белки — это всего лишь цепочки, сложенные из этих 20 аминокислот. Каждая из аминокислот, вероятно, служит для какой-то цели. У некоторых аминокислот в определенном месте находится атом серы, два атома серы в одном и том же белке образуют связь, то есть,

стягивают цепь в двух точках, образуя кольцо. У других есть избыточный атом кислорода, который придает веществу кислотные свойства, третьи обладают свойствами щелочей. У некоторых белков есть целые группы атомов, «свисающие» по бокам, так что они занимают большое пространство. Это одна из аминокислот — пролин — в действительности, не аминок-, а иминокислота. Это небольшое отличие приводит к тому, что цепь, содержащая пролин, в этом месте скручивается. Так что, если нам нужно создать определенный белок, мы должны дать следующие указания: здесь поместить один из серных крючков, затем добавить что-нибудь для заполнения места, там вставить что-нибудь, чтобы закрутить цепь. Таким образом, мы получим очень замысловатую на вид цепь, скрепленную во многих местах, с очень сложным строением. Все ферменты, по-видимому, устроены именно так. Одним из великих достижений современной науки (после 1960 г.) было установление точной пространственной атомной структуры определенных белков, состоящих из 56–60 аминокислот. Было установлено точное местоположение более тысячи атомов (ближе к двум тысячам, если считать и атомы водорода), входящих в сложную структуру двух белков (одним из них был гемоглобин). Одной из печальных сторон этого открытия было то, что это строение ничего нам не говорит: мы не понимаем, почему гемоглобин именно такой. Конечно, это следующая проблема, над которой нам предстоит поломать голову.

Другая проблема: откуда ферменты знают, кем им стать? Красноглазая мушка производит красноглазую же мушку, значит, вся информация о ферменте, производящем красный пигмент, должна передаваться от одной мушки к другой. Эта передача осуществляется не белком, а веществом в ядре клетки, под названием ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота). Это — главное, что передается от одной клетки другой (например, половые клетки состоят почти целиком из ДНК) и переносит информацию о том, как производить ферменты. ДНК — это «чертеж». Как он выглядит и на что он похож? Во-первых, такой чертеж должен обладать способностью самовоспроизводиться. Во-вторых, он должен уметь «давать указания» белку. Что касается воспроизводства, мы могли бы думать, что оно происходит подобно делению клетки. Клетка просто подрстает и делится пополам. В таком случае, должно ли так же обстоять дело и с молекулами ДНК, чтобы они сначала росли, а потом делились?

Нет, это исключено! Каждый *атом*, конечно, не может расти и делиться пополам! Так что воспроизвести молекулу можно только каким-то более хитрым способом.

Структура ДНК изучалась сначала химическими методами (чтобы выяснить ее состав), затем рентгенографически (чтобы установить пространственную структуру молекулы). Итогом было следующее замечательное открытие: молекула ДНК представляет собой пару цепочек, вьющихся друг вокруг друга. Скелет каждой из этих цепочек, хоть и похожий на белковые цепи, но химически отличный от них, — это последовательность сахарных и фосфатных групп, как показано на рис. 3.2. Из схемы видно, каким образом цепь может содержать инструкцию, необходимую для постройки белка, потому что, если мы разделим эту сдвоенную цепь надвое посередине, то получим ряд веществ *BAADC...*; не исключено, что у каждого живого существа этот ряд будет свой. Так что, возможно, конкретные *указания*, как производить белки, содержит определенный *ряд* ДНК.

К каждой сахарной группе в цепи присоединено определенное поперечное звено, связывающее две цепи. Однако эти звенья неодинаковы; их существует четыре вида: они называются аденин, тимин, цитозин и гуанин, для простоты обозначаемые *A, B, C* и *D*. Интересно, что сочетаться вместе могут только определенные пары, например, *A* и *B*, *C* и *D*. Эти пары помещаются на двух нитях таким образом, что «подходят друг другу», и обладают сильной энергией взаимодействия. Однако *C* не подойдет к *A*, а *B* к *C*. Так что, если один из них — *C*, то ему должен соответствовать *D*, и т. д. Каждой букве в одной цепи соответствует определенная буква в другой.

Так что же с воспроизведением? Предположим, мы разделили эту цепь надвое. Как можно построить еще одну точно такую же? Если бы за распределение веществ в клетке отвечал некий промышленный отдел, который поставлял бы сахар, фосфат и модули *A, B, C* и *D*, пока не привязанные к цепи, то к каждой половинке цепи можно было бы присоединить только звенья, дополняющие *BAADC...*, а именно, *ABBCD...* Таким образом, как только при делении клетки цепь распадается посередине, и одна половинка в конце процесса деления оказывается в одной клетке, а другая — в другой, каждая из этих полуцепей набирает себе дополнение.

Наконец, последний вопрос, как именно порядок модулей *A, B, C* и *D* определяет порядок расположения аминокислот в бел-

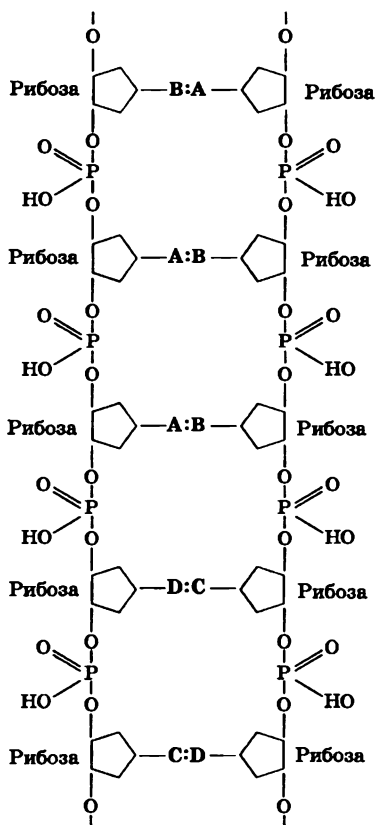


Рис. 3.2. Схема ДНК

ке? Сегодня это одна из главных нерешенных проблем в биологии. Но первые намеки, или крупиты информации, таковы: в клетке есть миниатюрные частицы, именуемые микросомами, и сейчас известно, что именно в них вырабатываются белки. Но микросомы находятся не в ядре, где расположена ДНК со своими инструкциями. Этому должно быть какое-то объяснение. Однако известно, что от ДНК отделяются маленькие части молекул — не такие длинные, как вся ДНК, несущая в себе информацию, а как бы маленький отрезок. Они называются РНК — но это неважно. Это нечто вроде уменьшенной копии ДНК. РНК каким-то образом переносит указание о том, какой

белок производить (этот факт известен), и проникает в микросому; в микросоме синтезируется белок. Это также известно. Однако как именно поступают и выстраиваются в цепь аминокислоты в соответствии с кодом, зашифрованным в РНК, пока не известно. Мы не умеем читать этот код. Так что, если модули выстроены в последовательности *A, B, C, C, A*, то и тогда мы не знаем, какой белок будет произведен.

Конечно, ни в одной отрасли знаний сейчас не достигается столько успехов на стольких направлениях, как в биологии. Но если бы нас спросили о том, какая гипотеза из всех была самой продуктивной, ведя нас все дальше в понимании жизни, мы обязаны были сказать: *«все состоит из атомов»*, и все, что происходит в живых существах, можно представить как совокупность колеблющихся и движущихся атомов.

Астрономия

В нашем скоропалительном обзоре всей Вселенной очередь дошла до астрономии. Астрономия старше физики. На самом деле, она способствовала возникновению физики, показав восхитительную простоту движения звезд и планет, с объяснения этого и *началась физика*. Но самым выдающимся открытием астрономии было открытие того, что *звезды состоят из точно таких же атомов, что и Земля**. Как это было доказано? Атомы высвобождают свет определенных частот, подобно тембру

* Как быстро летит наш рассказ! Как много кроется за каждой фразой в этой короткой истории! «Звезды состоят из таких же атомов, что и Земля». Обычно мне одной такой темы хватает на целую лекцию. Поэты говорят, что наука лишает звезды их красоты, раз звезды — это просто скопления атомов газа. Но здесь ничего не «просто». Я тоже могу любоваться звездами в пустыне и чувствовать их. Но кто из нас видит больше? Безбрежность небес превосходит мое воображение, мой человеческий взгляд не может оторваться от созерцания этой круговерти, улавливает свет, которому миллион лет. Я вижу безбрежность — частью которой я являюсь; кто знает, может быть, вещество, составляющее мое тело, было извергнуто с какой-то забытой звезды, такой же как вот эта. Я смотрю на звезды гигантским оком Паломарского телескопа и вижу, как они устремляются во все стороны от той точки, где они, возможно, были все вместе. Как все это устроено, каков смысл всего этого, и что было причиной? Тайнственного не станет меньше, если знать немного больше. Ибо в истине намного больше чудесного, чем мог вообразить любой художник прошлого! Почему современные поэты не говорят об этом? Что это за поэты, которые могут говорить о Юпитере, только как о человеке, и молчат, если это огромный вертящийся шар из метана и аммиака?

музыкального инструмента, обладающего определенными высотоми, или частотами звука. Когда мы слышим одновременно несколько звуков, мы можем различать их, но, глядя на смесь различных цветов, мы не можем сказать, из каких частей она составлена, потому что глаз гораздо хуже распознает подобные вещи, чем слух. Однако при помощи спектроскопа становится возможным анализ частот световых волн, он позволяет видеть истинные тона атомов дальних звезд. Ведь два химических элемента были открыты сначала на звездах, а потом уже на Земле: гелий (он был открыт на Солнце, откуда и происходит его название) и технеций (был открыт на некоторых холодных звездах). Конечно же, раз звезды состоят из таких же атомов, какие есть на Земле, то мы можем гораздо лучше понять их природу. Сейчас мы знаем достаточно много о поведении атомов при высоких температурах и невысоких плотностях, так что мы можем анализировать поведение звездного вещества при помощи статистической механики. Даже не умея воспроизвести нужные условия на Земле, часто, используя основные физические законы, мы можем предсказать точно, или почти точно, что произойдет на звездах. Таким образом физика помогает астрономии. Как ни странно это может показаться, мы понимаем процессы, происходящие внутри Солнца, гораздо лучше, чем процессы внутри Земли. Да, заглянуть через окуляр телескопа внутрь звезды практически невозможно, но, несмотря на это, мы можем понять, что происходит *внутри* звезды, так как мы умеем *рассчитывать*, как поведут себя атомы в большинстве случаев.

Одним из самых впечатляющих открытий было открытие источника энергии звезд, благодаря которому они не гаснут. Один из тех, кто сделал это открытие, гулял со своей девушкой вечером того дня, как понял, что на звездах происходит *ядерная реакция*, чтобы они горели. Она сказала: «Посмотри, как чудесно сияют звезды!» Он ответил: «Да, а ведь сегодня я единственный человек в мире, который знает, *почему* они сияют». Она просто рассмеялась в ответ. Ее совсем не впечатлило, что рядом с ней единственный человек, понимающий, почему горят звезды. Ну что ж, грустно быть одиноким, но такова жизнь.

Именно ядерное «горение» водорода обеспечивает энергией Солнце; водород превращается в гелий. Из водорода в глубинах звезд вырабатываются другие химические элементы. Вещество, из которого *мы с вами* состоим, было некогда «приго-

товлено» внутри звезды, а потом разбросано в пространстве. Откуда это известно? Этому есть ключ. Содержание в веществе различных изотопов C^{12} и C^{13} никогда не меняется в ходе химических реакций, потому что в химических реакциях они участвуют совершенно одинаково. Это соотношение — результат только ядерных реакций. Изучая пропорции изотопов в холодных, угасших углях, составляющих наши тела, мы можем заключить, какова была та *топка*, в которой образовалось наше вещество. Эта топка была очень похожа на звезды, так что очень вероятно, что наши элементы были «сделаны» внутри звезд и потом разбросаны в пространстве каким-нибудь взрывом, называемым нами Новой или Сверхновой звездой. Астрономия настолько близка физике, что мы будем изучать многие астрономические вопросы, продвигаясь вперед в наших лекциях.

Геология

Теперь мы обратимся к так называемым наукам о Земле, или *геологии*. К ним относится прежде всего метеорология, или наука о погоде. Конечно, *инструменты* метеорологии — это физические приборы, и они стали возможны именно благодаря развитию экспериментальной физики, как объяснялось выше. Однако ни один физик никогда не разработал удовлетворительной теории метеорологии. Вы можете сказать: «Да ведь здесь нет ничего, кроме воздуха, а уравнения движения воздуха нам известны». Да, известны. «А тогда, раз нам известно состояние воздуха сегодня, почему мы не можем предсказать состояние воздуха на завтра?» Во-первых, мы *не знаем*, каково на самом деле состояние воздуха сегодня, потому что он всегда и везде кружится и завихряется. Оказывается, он очень чуток к малейшим влияниям и даже неустойчив. Если вы когда-нибудь видели, как гладко вода течет через плотину, но падая, разбивается на множество капелек, то вы поймете, что я имею в виду под «неустойчивостью». Вы знаете состояние воды до того, как она поступает в водослив; ее движение очень плавное; но в какой именно момент появляются капли? От чего зависит, на какие струи и как именно разобьется поток? Все это неизвестно, так как течение воды неустойчиво. Даже спокойная масса воздуха, проходя между гор, распадается на отдельные вихри и возмущения. Во многих областях науки мы встречаемся с тем, что на-

зывается *турбулентное течение*, которое на сегодняшний день невозможно проанализировать. Поспешим оставить тему погоды и перейдем к геологии!

Главный вопрос геологии — почему Земля именно такая, какая она есть? Самые очевидные процессы происходят прямо у вас перед глазами: реки подмывают берега, поля заносит пылью и т. д. Это понять довольно просто, но всегда, когда мы имеем дело с эрозией, происходит еще кое-что обратное. Горы сегодня в среднем не ниже, чем они были в прошлом. Значит, должны иметь место процессы *горообразования*. Если вы будете изучать геологию, то убедитесь, что действительно *имеют место* такие горообразовательные и вулканические процессы, которые никто не может объяснить, но которые являются частью геологии. Природа вулканов, на самом деле, все еще непонятна. В чем заключается причина землетрясений — тоже, по большому счету, неясно. Понятно, что если нечто давит на что-то, то что-то треснет, что-то сдвинется — это все верно. Но что давит, и почему? Теория утверждает, что внутри Земли есть циркуляция из-за разницы температур внутри Земли и у поверхности — эти потоки, двигаясь, слегка надавливают на поверхность. Так что, если два потока встречаются друг с другом, вещество будет собираться складками, образуя горные пояса, которые находятся под очень большим напряжением, возникнут вулканы и землетрясения.

А что же с недрами Земли? Хорошо известна скорость распространения волн землетрясений по земной коре, а также распределение плотности внутри Земли. Но у физиков до сих пор нет теории плотности вещества при давлениях, которые можно ожидать в центре Земли. Другими словами, мы не представляем себе сколько-нибудь точно свойства материи при таких условиях. С Землей мы продвинулись гораздо меньше, чем с состоянием вещества в звездах. Необходимый для этого математический аппарат не разработан, возможно, нам не придется слишком долго ждать, пока кто-то осознает важность этой задачи и действительно решит ее. Другое дело, что, даже зная плотность вещества внутри Земли, мы не будем еще в состоянии представить циркуляцию потоков или установить свойства горных пород при очень высоких давлениях. Неизвестно, при каком давлении они «поддадутся»; все это еще предстоит выяснить экспериментально.

Психология

Теперь перейдем к рассмотрению еще одной науки — *психологии*. Кстати, психоанализ — не наука: в лучшем случае это медицинский вопрос, а возможно, даже нечто гораздо более похожее на знахарство. У знахарства тоже есть теория о причинах болезней — множество различных «духов» и т. д. У знахаря есть теория, что такая болезнь, как, скажем, малярия вызывается духом, летающим по воздуху; но он не лечит ее, размахивая над больным змеей, а дает хинин. Поэтому, если вы заболели малярией, я посоветую вам обратиться к знахарю, ибо он больше всех в племени знает об этой болезни. Но, с другой стороны, его знание — не наука. Психоанализ не был подвергнут тщательной экспериментальной проверке, и нет никакой возможности установить перечень случаев, когда он помог людям, а когда не помог и т. д.

Другие ветви психологии, такие как психология чувственного восприятия (что происходит в глазу и что происходит в мозге), менее интересны, если угодно. Все же в изучении этих вопросов был достигнут небольшой, но реальный прогресс. Самые интересные технические проблемы можно относить к психологии, а можно и не относить. Главная проблема в изучении мышления или нервной системы состоит в следующем: когда животное обучается чему-то, оно может делать что-то иначе, чем оно делало это раньше, а значит, клетки мозга тоже должны измениться, если они состоят из атомов. *Что именно меняется?* Мы не знаем, где и какие изменения в клетках мозга нам искать, чтобы объяснить память. Мы не знаем, что значит учиться, и с какими изменениями в нервной системе это связано. Это очень важная проблема, которая все еще не решена. Даже если мы допустим, что память имеет какое-то материальное воплощение в мозге, он представляет собой такое огромное множество пересекающихся проводов и нервов, что его невозможно подвергнуть прямому анализу. Его можно сравнить со сложным компьютером и его элементами, так как и там, и здесь есть множество проводов, и есть элементы, подобные синапсам (соединениям между нервами). Отношение между мозгом и вычислительной машиной — очень интересный вопрос, который у нас нет времени обсудить подробнее. Можно предполагать, конечно, что такая аналогия даст нам очень мало для объяснения реальной сложности поведения человека. Все люди такие разные! Прой-

дет еще много времени, прежде чем мы дойдем до этого. Начинать нужно с гораздо более простых вещей. Даже если бы нам удалось установить, почему *собака* ведет себя таким образом, это уже было бы огромным прогрессом. Собак легче понять, но пока что и их поведение никто не объяснил.

С чего все началось?

Чтобы физика была полезной другим наукам не только в деле изобретения инструментов, но и в *теоретическом* отношении, она должна снабдить физиков описанием объекта на физическом языке. Могут, например, спросить: «Почему лягушка прыгает?», — и физик не сможет ответить. Вот если ему скажут, что такое лягушка, что в ней столько-то молекул, где проходят нервы и т. д. — это совсем другое дело. Если геолог более или менее толково объяснит нам, что представляют собой Земля или звезды, то мы сможем попробовать в этом разобраться. Чтобы физическая теория приносила хоть какую-то пользу, мы должны знать, как расположены атомы. Чтобы понимать химию, мы должны точно знать, из каких именно атомов состоит интересующее нас вещество, иначе мы не сможем проанализировать его. Это, конечно, лишь одно из ограничений.

В родственных науках есть также проблема *другого рода*, которой нет в физике. Можно обозначить ее, за отсутствием лучшего термина, историческим вопросом. Если у нас будет достаточно знаний по биологии, то мы захотим узнать, как появилось на Земле все то многообразие живого, которое мы наблюдаем сейчас. Этим занимается теория эволюции, важная составляющая биологии. В геологии мы не только хотим знать, как образовались горы, но также как образовалась сама Земля, каково происхождение Солнечной системы и т. д. Это, конечно, ведет нас к следующему вопросу — из какой материи складывалась тогда Вселенная? Как образовались звезды? Каковы были начальные условия? Это — проблема астрономической истории. Сейчас многое прояснилось относительно образования звезд, возникновения элементов, из которых мы состоим, и даже кое-что о происхождении Вселенной.

В настоящее время физика не изучает ни один исторический вопрос. Не стоит вопрос наподобие «Вот законы физики; откуда они произошли?» Мы не считаем в настоящее время, что законы физики каким-то образом меняются со временем, что

прежде они были иными, чем сейчас. Конечно, это не исключено, и как только мы обнаружим, что они меняются, исторический вопрос физики органически сольется в остальную историю Вселенной, и тогда физики будут обсуждать такие же проблемы, как астрономы, геологи и биологи.

И, наконец, существует одна физическая проблема, родственная многим наукам, очень старая и до сих пор не решенная. Это не проблема поиска новых элементарных частиц, а наследие, оставшееся с давних времен, более сотни лет назад. Никто из физиков до сих пор не смог предложить удовлетворительной математической модели этого явления, несмотря на его огромную важность для других наук. Это явление *циркуляции или вихревой жидкости*. Наблюдая эволюцию звезд, мы приходим к моменту, когда в звезде начинается конвекция, и после этого мы более не в состоянии предсказать, что будет происходить с ней дальше. Через несколько миллионов лет звезда взрывается, но мы не можем установить причину и этого. Мы не можем анализировать погодные явления. Мы не знаем, каковы могут быть предполагаемые потоки внутри Земли. Простейшая иллюстрация этой проблемы такова: нужно взять очень длинную трубку и пустить через нее воду на очень высокой скорости. Спрашивается, какое давление требуется, чтобы протолкнуть через трубку данное количество воды? На этот вопрос невозможно ответить, исходя только из первичных законов и свойств воды. Если вода течет медленно, или если вместо воды сочится что-то вязкое, наподобие меда, то все можно довольно точно вычислить. Вы можете найти это в любом учебнике. Но обычная, жидкая вода, текущая по трубе, остается неподвластной точным вычислениям. Это одна из центральных проблем, которую нам предстоит решить когда-то, но пока она не решена.

Один поэт как-то сказал: «Весь мир — в бокале вина». Возможно, мы никогда не узнаем, что он имел в виду, — ведь поэты пишут не для того, чтобы их понимали. Но правда, что если мы посмотрим в бокал вина достаточно пристально, то увидим в нем целый мир. Здесь есть с чем поработать физику — искрящаяся жидкость, испаряющаяся в зависимости от ветра и погоды, преломление света в стакане, а воображение добавит сюда также атомы. Стекло представляет собой суть от сути земных камней, и в его составе мы видим тайны возраста Вселенной и эволюции звезд. А что за странный набор химических веществ это вино? Как они возникли? Здесь есть закваска, ферменты, вытяжки,

питательные вещества. Ведь в вине скрывается еще одна истина: вся жизнь есть брожение. Нельзя установить химическую природу вина, не установив, как это сделал Луи Пастер, причину множества болезней. Как полон жизнью этот стакан красного вина, уверенно заявляющий о своем существовании созерцающему его сознанию! И если наш ограниченный ум, ради некоторого удобства, разделяет этот стакан вина, эту Вселенную, на части — физику, биологию, геологию, астрономию, психологию и т. д. — помните, что природа об этом не знает! Так что давайте сольем все это воедино, не забывая о его предназначении. Давайте получим от этого стакана вина одно последнее удовольствие: выпьем его и забудем обо всем!



4

Сохранение энергии

Что такое энергия?

С этой главы, завершив общее описание физики, мы начнем более близко знакомиться с различными ее вопросами. В качестве примера тех представлений и способа рассуждения, которые могут использоваться в теоретической физике, рассмотрим один из самых основных законов физики — закон сохранения энергии.

Существует факт, или, если хотите, *закон*, управляющий всеми природными явлениями, известными на сегодняшний день. У этого закона нет исключений — насколько мы знаем, он абсолютно точен. Этот закон называется *сохранение энергии*. Он гласит, что существует определенная величина, называемая энергией, которая не меняется ни при каких превращениях, происходящих в природе. Это весьма отвлеченное представление, это по существу математический принцип; согласно ему, существует некая числовая величина, которая не изменяется, что бы ни происходило. Это не описание какого-то механизма или конкретного процесса; это просто то странное обстоятельство, что мы можем вычислить некоторое число, и когда мы закончим наблюдать за проделками природы и вычислим это число еще раз, оно останется прежним. (Нечто вроде того, что мы говорили о слоне на шахматной доске: в начале игры он на черной клеточке, и мы можем предсказать, даже не зная подробностей игры, что и через много шагов он все еще будет находиться на черной клеточке. Этот закон как раз такого типа.) Поскольку это абстрактное представление, мы проиллюстрируем его при помощи аналогии.

Представим себе ребенка, скажем, «Дениса-проказника», у которого есть игрушечные кубики, которые совершенно не-

возможно ни разломать, ни разделить на части. Все они одинаковы. Предположим, что у него 28 кубиков. Мама оставляет его утром в комнате с 28 кубиками. Вечером она из любопытства очень тщательно пересчитывает кубики и обнаруживает удивительную закономерность — что бы ее сын ни делал с кубиками, их всегда остается 28! Так продолжалось довольно долго, пока в один прекрасный день она не обнаружила, что кубиков только 27, но, немного поискав, она обнаружила, что один кубик спрятан под ковром — она должна была обыскать всю комнату, чтобы убедиться, что число кубиков осталось неизменным. В другой раз число кубиков, по всей видимости, изменилось: их было только 26. Внимательный осмотр комнаты показал, что окно открыто, и два кубика валяются на улице. На следующий день она насчитала 30 кубиков! Это привело ее в замешательство, пока она не вспомнила, что в гости приходил Брюс со своими кубиками, и забыл парочку у Дениса. После того как она избавилась от лишних кубиков, закрыла окно, не пускала Брюса, некоторое время все шло нормально, пока вдруг число кубиков не сократилось до двадцати пяти. Однако в комнате был ящик для игрушек, и когда мама хотела заглянуть туда, мальчик заплакал и сказал, чтобы она не открывала его ящик. Мать не может открыть ящик, но, будучи очень любопытной и изобретательной, она придумала схему! Она знает, что один кубик весит 100 г, и когда она взвешивала ящик для игрушек до пропажи кубиков, он весил 500 г. В следующий раз, когда она захотела проверить сохранность кубиков, она взвешивала ящик, вычитала 500 г и делила на 100 г. И она обнаружила следующее:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Число} \\ \text{имеющихся} \\ \text{кубиков} \end{array} \right) + \frac{(\text{Вес ящика}) - 500 \text{ г}}{100 \text{ г}} = \left(\begin{array}{c} \text{Постоянная} \\ \text{величина} \end{array} \right) \quad (4.1)$$

Затем возникли новые отклонения: число кубиков уменьшилось, но внимательный осмотр показал, что уровень грязной воды в тазу для стирки почему-то изменился. Ребенок, оказывается, бросал кубики в воду, и она не могла их видеть из-за того, что вода в тазу была слишком грязная. Но она смогла вычислить, сколько кубиков в воде, добавив новый член в свое уравнение. Поскольку изначально уровень воды был 15 см, и каж-

дый кубик поднимал этот уровень на полсантиметра, то новая формула будет такой:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Число} \\ \text{имеющихся} \\ \text{кубиков} \end{array} \right) + \frac{(\text{Вес ящика}) - 500 \text{ г}}{100 \text{ г}} + \frac{(\text{Уровень воды}) - 15 \text{ см}}{1/2 \text{ см}} = \left(\begin{array}{c} \text{Постоянная} \\ \text{величина} \end{array} \right) \quad (4.2)$$

Постепенно ее мир усложнялся, и она обнаруживала все новые элементы уравнения, позволяющие ей вычислять, сколько кубиков находилось в местах, куда она не могла заглянуть. В конце концов, она получила сложную формулу некоторой величины, которую *требуется вычислить*, всегда остающуюся неизменной, что бы ее ребенок ни натворил.

В чем здесь аналогия с сохранением энергии? Самое существенное в этой картине, что должно быть сразу оставлено в стороне: *не существует никаких кубиков*. Отбросьте первые члены в выражениях (4.1) и (4.2), и получится, что мы вычисляем более или менее абстрактные величины. Аналогия заключается в следующем. Во-первых, когда мы вычисляем количество энергии, часть ее иногда покидает систему и исчезает; бывает и наоборот — поступает новая энергия. Чтобы проверить сохранение энергии, мы должны быть уверены в том, что не забыли учесть ее убыль или прибыль. Во-вторых, у энергии множество *различных форм*, и для каждой из них существует своя формула. Есть энергия тяготения, кинетическая энергия, тепловая энергия, энергия упругости, электрическая энергия, химическая энергия, энергия излучения, ядерная энергия, энергия массы. Если мы объединим формулы для вклада каждой из этих составляющих, то сумма не будет меняться, если система замкнута.

Важно осознавать, что в физике на сегодняшний день нет понимания того, *что такое энергия*. Мы не представляем, например, что энергия поступает маленькими капельками определенного размера. Это не так. Однако есть формулы для вычисления некоторых величин, и когда мы складываем их, они все вместе составляют «28» — всегда одно и то же число. Отвлеченность этого принципа заключается в том, что он ничего не говорит нам о механизме или о *причинах* появления в формуле различных членов.

Потенциальная энергия тяготения

Сохранение энергии можно понять только в том случае, если у нас есть уравнения для всех ее видов. Я хочу рассказать вам о формуле энергии тяготения у поверхности Земли, и вывести ее, но не так, как это было сделано исторически впервые, а просто рядом соображений, придуманных специально для этой лекции. Я хочу дать вам представление о том замечательном факте, что большая часть наших знаний о природе может быть извлечена из немногих фактов при помощи тщательного размышления. Это пример того, чем могут заниматься физики-теоретики. Вывод подсказан блестящими рассуждениями г-на Карно об эффективности паровых машин*.

Рассмотрим грузоподъемные машины, которые обладают способностью поднимать один груз, опуская при этом другой. Также предположим в качестве гипотезы, что *вечное движение этих машин невозможно*. (На самом деле, недопустимость вечного движения — общая формулировка закона сохранения энергии.) Мы должны постараться дать как можно более точное определение вечного движения. Во-первых, давайте дадим такое определение для грузоподъемных устройств. Если мы подняли и опустили какие-то грузы, возвратили устройство в исходное положение и после этого обнаружили, что в результате оказался *поднят некоторый груз*, то мы получили вечный двигатель, потому что этот поднятый груз можно использовать, чтобы поднять что-то еще. Конечно, *предполагается*, что машина, поднимавшая грузы, возвращается *точно* в свое *изначальное состояние*, и, кроме того, она *ни от чего не зависит*, то есть, не получает энергию для поднятия грузов из какого-нибудь внешнего источника — как в примере с кубиками Брюса.

Рассмотрим простейшее устройство для подъема грузов, изображенное на рис. 4.1. Это устройство поднимает тройной вес. Мы кладем три единицы груза на одну чашу весов, и одну — на другую. Однако чтобы устройство сработало, нам придется снять небольшую часть веса с левой чаши. С другой стороны, мы можем поднять вес одной единицы и опустить вес трех единиц, если немного схитрим и уберем чуть-чуть вес на правой чаше. Конечно, мы понимаем, что для любого *настоя-*

* Нашей целью здесь является не итоговая формула, которую вы уже, наверное, знаете, а возможность прийти к ней теоретическим путем.



Рис. 4.1. Пример простой грузоподъемной машины

щего подъемного устройства будет необходимо добавить небольшой вес, чтобы оно заработало. Этим мы пренебрежем, временно. Идеальные машины, хоть они и не существуют, зато не требуют добавочного веса. Машину, которую мы на самом деле используем, можно считать *почти* обратимой: то есть, она может поднять вес трех единиц, опуская вес одной единицы, а потом поднять вес, почти равный весу одной единицы, на ту же высоту, опуская вес трех.

Представим, что существуют два типа устройств: *необратимые*, к которым относятся все реальные устройства, и *обратимые*, — но их, конечно, не существует в действительности, как бы тщательно мы ни продумывали их опоры, рычаги и т. д. Тем не менее, мы предполагаем, что существует такая обратимая машина, которая опускает единичный груз (один килограмм или любую другую единицу) на единичное расстояние, и при этом поднимает тройной груз. Назовем эту обратимую машину машиной А. Предположим, что эта конкретная обратимая машина А поднимает тройной груз на высоту X . Затем предположим, что у нас есть другая машина, B , не обязательно обратимая, которая также опускает единичный вес на единичное расстояние, но при этом поднимает тройной вес на высоту Y . Тогда возможно доказать, что Y не может превышать X ; то есть, невозможно построить машину, которая поднимет груз хоть сколько-нибудь выше, чем обратимая. Давайте посмотрим, почему. Допустим, что Y выше X . Возьмем единичный груз и опустим его на единицу высоты при помощи машины B . При этом тройной груз поднимется на высоту Y . Тогда мы смогли бы опустить этот груз с высоты Y до X , получая энергию ниоткуда. Затем мы используем обратимую машину А, чтобы вновь опустить тройной груз на расстояние X и поднять единичный груз на единичную высоту. Это вернет единичный груз на то же самое место и приведет обе машины в первоначальное состояние готовыми к новой работе! Следовательно, если Y больше X , то возникает вечный двигатель, что невозможно, как мы допусти-

ли выше. Исходя из этих предположений, мы можем заключить, что Y не больше X , так что обратимая машина была бы лучшей из всех, которые возможно соорудить.

Можно также показать, что обратимые машины должны поднимать груз *на одну и ту же высоту*. Предположим, что B — тоже обратима. Доказательство того, что Y не больше X , будет применимо и в этом случае, но, кроме этого, мы можем сделать и обратное заключение и доказать, что X не больше Y . Это, конечно, очень примечательный результат, потому что он позволяет нам анализировать высоты, на которые различные устройства поднимают грузы, *не заглядывая в их внутреннее устройство*. Если кто-то соорудит необычайно сложную систему рычагов для подъема тройного груза на определенную высоту за счет опускания единичного груза на единичное расстояние, и если мы сравним эту систему с простым обратимым рычагом, который делает то же самое, то эта система поднимет груз точно не выше простого рычага, а, скорее всего, ниже. Если даже эта система будет обратима, то мы точно знаем, *на сколько* высоко она поднимет груз.

Вывод: каждая обратимая машина, по какому бы принципу она ни действовала, опуская 1 кг на 1 м, всегда поднимает 3 кг на одну и ту же высоту X . Ясно, что это универсальный и очень полезный закон. Другой вопрос, чему равно X ?

Допустим, у нас есть обратимая машина, которая способна поднять на высоту X трехкратный груз. Закрепим три шара в неподвижном каркасе, как показано на рис. 4.2. Четвертый шар лежит на подставке на расстоянии 1 м от пола. Машина может поднять три шара за счет опускания одного на 1 м. Устроили подвижную платформу, в которой закрепляются три шара, она имеет дно и две полки высотой X , а неподвижный каркас, в котором шары изначально находятся, устроен так же (рис. 4.2, *а*). Сначала мы перекачиваем шары из каркаса на полки платформы (*б*) и допускаем, что это не требует расхода энергии, потому что высота при этом не меняется. Затем включим обратимую машину, и один шар скатывается на пол, поднимая каркас на высоту X (*в*). А мы так ловко устроили каркас, что шары снова находятся напротив полок. Тогда мы выгружаем шары в каркас (*г*). Выгрузив шары, мы можем вернуть устройство в первоначальное состояние. Теперь у нас три шара на трех верхних полках стеллажа и один — на полу. Но, как ни странно это звучит, мы, в определенном смысле, не под-

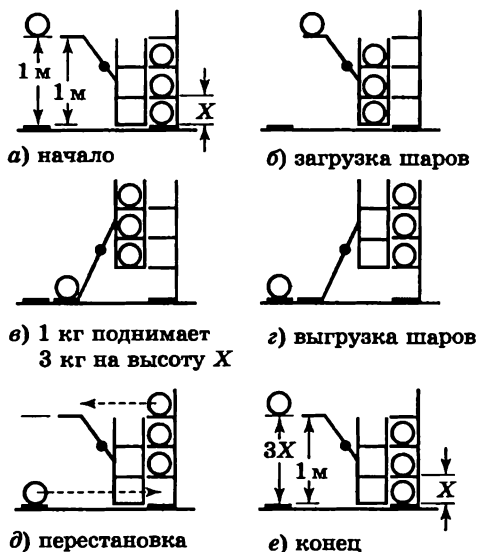


Рис. 4.2. Обратимая машина

няли два шара из трех, потому что и раньше два шара находились на полках 2 и 3. Так что в итоге мы подняли *один шар* на высоту $3X$. Если бы $3X$ превышало 1 м, можно было бы *опустить* один шар, чтобы вернуть всю систему в исходное состояние (e), и начать работу снова. Поэтому $3X$ не может быть больше 1 м, ибо в противном случае мы получили бы вечное движение. Но подобным же образом мы можем доказать, что $3X$ не может быть меньше 1 м, заставив всю систему работать в обратном порядке, поскольку это обратимая машина. Поэтому $3X$ не больше и не меньше одного метра, и мы заключаем, на основе доказанного, что $X = \frac{1}{3}$ м. Более общий вывод очевиден: при работе обратимой машины 1 кг падает с некоторой высоты; тогда машина может поднять p кг на $1/p$ этой высоты. Тот же результат можно сформулировать иначе: произведение трех килограммов на высоту их подъема (в нашей задаче это был X) равняется одному килограмму, помноженному на высоту, с которой он опустился (в нашем случае 1 м). Если мы умножим все грузы на высоту, на которой они сейчас находятся, запустим обратимую машину, и после этого вновь умножим веса на их высоты, то получим то же число. (Здесь нужно

обобщить наш пример, в котором мы перемещали один груз, на случай, когда мы поднимаем и опускаем несколько различных грузов, — но это очень просто.)

Это произведение суммы весов на высоту мы называем *потенциальной энергией тяготения* — т. е. энергией, которой обладает тело в силу своего положения в пространстве относительно Земли. Тогда формула для энергии тяготения, если не рассматривать слишком большие высоты (сила притяжения ослабевает с высотой) равняется

$$\left(\begin{array}{l} \text{Потенциальная} \\ \text{энергия тяготения} \\ \text{одного тела} \end{array} \right) = (\text{Вес}) \times (\text{Высота}) \quad (4.3)$$

Это очень красивое рассуждение. Единственная проблема в том, что, возможно, оно и неверно. (В конце концов, природа *не обязана* следовать нашим рассуждениям.) Например, вдруг оказалось бы, что вечное движение на самом деле возможно. Некоторые допущения могут быть ошибочны, или мы можем допустить ошибку в рассуждениях, поэтому любое доказательство необходимо проверять экспериментально. *Опыт показывает*, что это рассуждение действительно верно.

Общее наименование энергии, которая зависит от положения одного тела относительно другого, — *потенциальная энергия*. В данном конкретном случае это — *потенциальная энергия тяготения*. Если же производится работа против электрических сил, а не сил тяготения, если мы будем «поднимать» заряды относительно других зарядов с помощью множества рычагов, то запас энергии будет называться *электрической потенциальной энергией*. Общий принцип заключается в том, что изменение энергии равняется силе, умноженной на величину изменения расстояния, на котором она действует:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Изменение} \\ \text{энергии} \end{array} \right) = (\text{Сила}) \times \left(\begin{array}{l} \text{Расстояние,} \\ \text{на котором} \\ \text{она действует} \end{array} \right) \quad (4.4)$$

По ходу курса мы еще не раз будем возвращаться к другим видам потенциальной энергии.

Принцип сохранения энергии очень полезен при предсказании того, что должно произойти в самых различных обстоятельствах. В школе мы изучали много законов о блоках и рыча-

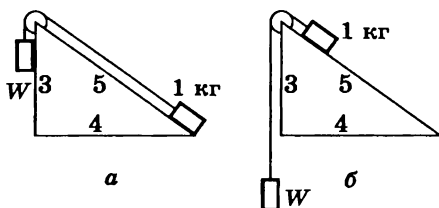


Рис. 4.3. Наклонная плоскость

гах, используемых различными способами. Теперь мы видим, что все эти «законы» сводятся к *одному-единственному*, и нам не нужно зазубривать 75 правил. Простой пример — наклонная плоскость. Пусть это треугольник со сторонами 3, 4 и 5 (рис. 4.3). Мы прикрепим к блочку груз весом в 1 кг и положим его на наклонную плоскость, а с другой стороны блока подвесим груз W . Требуется узнать, какой должна быть тяжесть W , чтобы уравновесить 1 кг на наклонной плоскости. Как это можно узнать? Допустим, система уравновешена, является обратимой и потому может двигаться вверх и вниз. Тогда рассмотрим следующую ситуацию. В начальном положении (а) груз весом в 1 кг находится у основания, а вес W — на вершине. Когда W скользит вниз, то груз в 1 кг поднимается на вершину плоскости, а груз W опускается (б) на длину склона, или 5 м, от того уровня, на котором он был раньше. Мы *подняли* 1 кг груза только на *три* метра, а груз W опустили на *пять* метров. Следовательно, $W = \frac{3}{5}$ кг. Учтите, что мы вывели это из *сохранения энергии*, а не из разложения сил. Однако особенно остроумия здесь не требовалось. То же самое можно доказать еще более блестящим способом, который был открыт Стевином и даже высечен на его надгробии. Схема на рис. 4.4 показывает, что груз W должен равняться $\frac{3}{5}$ кг, не больше и не меньше, потому что цепь не вращается сама собой. Очевидно, что нижняя часть цепи уравновешивается сама собою, так что сила тяги трех шаров с одной стороны должна уравновешиваться силой тяги пяти шаров с другой, или другим количеством, в зависимости от соотношения длин сторон. Глядя на эту схему, становится очевидным, что W должно равняться $\frac{3}{5}$ кг (если на вашем надгробии начертаят подобную эпитафию, значит, ваша жизнь не прошла зря).

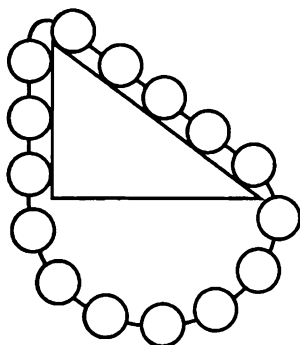


Рис. 4.4. Эпитафия Стевину

А вот задача посложнее: домкрат, изображенный на рис. 4.5. Рукоятка в 50 см используется для того, чтобы вращать винт, имеющий 5 витков на 1 см. Требуется узнать, какая сила должна быть приложена к рукоятке, чтобы поднять одну тонну. Если мы хотим поднять 1 тонну на 1 см, то мы должны повернуть рукоятку вокруг 5 раз. За один круг она описывает примерно 314 см, так что за 5 оборотов она должна пройти 15,7 м, и если мы применим систему различных блоков, шкивов и т. д., то сможем поднять 1 тонну при помощи некоторого меньшего веса W , приложенного к концу рукоятки. Так мы обнаруживаем, что W равняется примерно 640 г. И все это следует из закона сохранения энергии.

Возьмем теперь несколько более сложный пример, показанный на рис. 4.6. Брус или прут длиной 8 м имеет опору на одном конце. В середине бруса находится вес в 60 кг, а в двух метрах от опоры — еще один груз, весом в 100 кг. С какой силой мы должны тянуть вверх другой конец бруса, чтобы удерживать его в равновесии, если пренебречь весом бруса? Допустим, мы

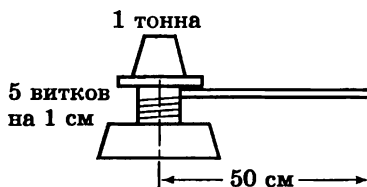


Рис. 4.5. Домкрат

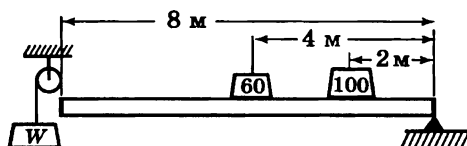


Рис. 4.6. Нагруженный брус с опорой на одном конце

присоединяем к концу бруса блок и подвешиваем к нему некоторый груз. Каким должен быть его вес W , чтобы уравновесить систему? Представим себе, что вес опускается на любое произвольное расстояние — чтобы облегчить себе подсчеты, допустим, что он опустился на 4 см — насколько при этом поднимутся два груза? Груз посередине поднимется на 2 см, а груз, находящийся в четверти длины от закрепленного конца бруса, поднимется на 1 см. Следовательно, исходя из того принципа, что сумма произведений высот на веса не меняется, мы можем заключить, что, если вес W , умноженный на 4 см, вычест из суммы произведений 60 кг на 2 см и 100 кг на 1 см, то должен получиться 0:

$$-4W + 2 \times 60 + 1 \times 100 = 0, \quad W = 55 \text{ кг.} \quad (4.5)$$

Так что нам потребуется груз в 55 кг, чтобы уравновесить брус. Идя таким путем, мы можем разработать законы «равновесия» — статику сложных мостовых сооружений и т. д. Этот метод называется *принципом виртуальной* (т. е. воображаемой) *работы*, потому что для использования такого метода доказательства мы должны *представить себе*, что система совершает незначительное движение — даже если *на самом деле* она не двигается или вообще *не может двигаться*. Достаточно использовать очень маленькое воображаемое движение, чтобы применить принцип сохранения энергии.

Кинетическая энергия

Чтобы проиллюстрировать другую разновидность энергии, рассмотрим маятник (рис. 4.7). Если отвести его в сторону и отпустить, он начнет колебаться вперед и назад. При этом он будет терять высоту, двигаясь от концов к середине. Куда девается потенциальная энергия? Когда маятник находится в нижней

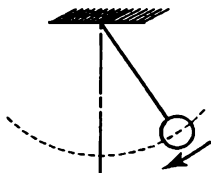


Рис. 4.7. Маятник

точке, энергия тяготения пропадает, тем не менее, он снова наберет высоту. Выходит, энергия тяготения должна переходить в другую форму энергии. Ясно, что именно *движение* маятника позволяет ему набирать высоту, следовательно, мы имеем дело с превращением части энергии тяготения в некую иную форму, когда маятник достигает низшей точки.

Нужно получить формулу для энергии движения. Вспомнивая наши рассуждения об обратимых машинах, мы можем легко показать, что движение маятника в низшей точке должно нести в себе ровно столько энергии, сколько требуется ему, чтобы подняться на определенную высоту, и при этом совершенно не важно, *каким образом* он это сделает или какое *расстояние* при этом пройдет. Поэтому мы получаем формулу равенства, в чем-то подобную той, которую мы писали для детских кубиков. Нам нужно включить в формулу другую форму энергии. Легко понять, как это сделать. Кинетическая энергия в низшей точке равняется произведению веса на ту высоту, на которую он будет способен подняться за счет этой энергии, из-за его скорости: $К.Э. = WH$.

Теперь нам требуется лишь такая формула, которая будет показывать какую-то зависимость высоты объекта от его скорости. Если тело запустить прямо вверх с определенной скоростью, оно достигнет определенной высоты; мы не знаем пока, какова будет эта высота, но она будет зависеть от скорости — для этого есть формула. Затем, чтобы найти формулу для кинетической энергии тела, движущегося со скоростью V , мы должны вычислить высоту, на которую он поднимается, и умножить на его вес. Скоро мы придем к тому, что сможем записать это следующим образом:

$$К.Э. = WV^2/2g. \quad (4.6)$$

Конечно, тот факт, что движение несет в себе энергию, никак не связан с тем, что мы находимся в поле тяготения. Не имеет значения, *откуда* берется движение. Это общая формула для любых скоростей. Обе формулы, (4.3) и (4.6), лишь приближительны, первая — потому что она становится неправильной при больших высотах, когда тяжесть тела ослабевает на больших расстояниях от Земли; вторая — из-за релятивистских поправок при очень больших скоростях. Однако когда мы, в конце концов, получим точную формулу для энергии, тогда закон сохранения будет истинным.

Другие формы энергии

Подобным же образом мы можем проиллюстрировать существование и других форм энергии. Во-первых, рассмотрим энергию упругости. Если мы растягиваем пружину, то должны совершить какую-то работу, потому что растянутая пружина способна поднять груз. То есть, в растянутом состоянии она способна совершать некоторую работу. Если мы попытаемся, как раньше, перемножить вес и высоту, это ничего не даст — нужно добавить еще кое-что, чтобы учесть тот факт, что пружина находится в растянутом состоянии. Энергия упругости — это формула для растянутой пружины. Сколько в ней энергии? Если мы отпустим пружину, то при прохождении через точку равновесия вся ее энергия упругости превратится в кинетическую и затем начнет колебаться между упругой энергией сжатия и растяжения и кинетической энергией. (Здесь также участвует изменение энергии тяготения, но мы можем проделать тот же эксперимент, не повесив пружину, а положив.) И пружина будет колебаться, пока не остановится — вот мы и попались! До сих пор мы хитрили, добавляя небольшие грузики, чтобы начать движение, или считая, что машины обратимы, или полагая, что они будут работать бесконечно. Но из опыта мы знаем, что все, в конце концов, останавливается. Куда делась энергия, когда пружина остановилась в своих колебаниях? Она перешла в *еще одну* форму энергии — *тепловую*.

Внутри пружин и рычагов есть кристаллы, состоящие из множества атомов. Теоретически, если проявить чудесное старание и осторожность при соединении частей, можно попытаться добиться того, чтобы ни один атом не сдвинулся с места, когда две части соприкасаются друг с другом. Но для этого нужно

быть очень осторожным. Обычно, когда одна вещь скользит по другой, происходят какие-то удары, покачивания из-за неровности поверхностей, и атомы внутри кристаллов приходят в движение. Так мы теряем доли этой энергии: когда движение замедляется, мы обнаруживаем лишь атомы, движущиеся безо всякого порядка. Да, это все еще кинетическая энергия, но она не связана ни с каким видимым движением. Что за чудо! Откуда же мы *знаем*, что здесь все-таки присутствует кинетическая энергия? Оказывается, при помощи термометра можно установить, что пружина или рычаг становятся *теплее*, то есть количество кинетической энергии действительно возрастает. Мы называем эту форму энергии *тепловой энергией*, но знаем, что это на самом деле не новая форма, а та же кинетическая энергия — только внутреннего движения. (Одна из трудностей всех опытов с большим количеством вещества заключается в том, что на самом деле мы не можем продемонстрировать сохранение энергии и на самом деле мы не можем построить обратимую машину, потому что каждый раз, когда мы передвигаем большой комок вещества, атомы не остаются в прежнем состоянии, и некоторое количество случайного движения переходит в атомную систему. Мы не можем ее увидеть, но мы можем измерить ее при помощи термометров и т. д.)

Есть и многие другие виды энергии и, конечно, мы не сможем описать их сейчас сколько-нибудь подробно. Существует электрическая энергия, связанная с притяжением и отталкиванием электрических зарядов. Существует энергия излучения, или энергия света — одна из форм электрической энергии, потому что свет может быть представлен как колебание электромагнитного поля. Существует химическая энергия, которая выделяется в химических реакциях. Энергия упругости в определенной мере похожа на химическую, химическая энергия отвечает за притяжение между атомами, как и энергия упругости. Сейчас мы понимаем это следующим образом: химическая энергия состоит из энергий двух видов — кинетической энергии вращения электронов внутри атомов и электрической энергии притяжения электронов и протонов. Затем, бывает ядерная энергия, которая отвечает за взаимное расположение частиц внутри ядра, и есть формулы для этой энергии, хотя основные законы нам и неведомы. Мы знаем, что она не электрическая, не тяготение, и не чисто химическая. Мы не знаем, какова ее природа. По-видимому, это добавочная форма

энергии. В конце концов, теория относительности видоизменяет формулу кинетической энергии, так что название это становится условным, сочетая ее с другим понятием: *энергией массы*. У объекта есть энергия уже потому, что он *существует*. Если позитрон и электрон неподвижны, ничем не занимаются (если мы отбросим в сторону тяготение и все прочие виды взаимодействий), а потом они соединяются и исчезают, то освобождается определенное количество энергии излучения, и это количество можно подсчитать. Все, что требуется — это знать массу объектов. Неважно, что это за объекты — два тела исчезли, определенное количество энергии появилось. Формула была впервые открыта Эйнштейном; она проста: $E = mc^2$.

Из наших рассуждений ясно, что закон сохранения энергии чрезвычайно полезен при анализе явлений, как мы показали на нескольких примерах, даже не зная формул. Если бы у нас были все формулы для всех видов энергии, то мы могли бы узнавать, не вдаваясь в детали, какие процессы возможны, а какие нет. Поэтому законы сохранения очень интересны. Естественно, встает вопрос, какие еще формы законов сохранения существуют в физике. Есть еще два закона, сходные с законом сохранению энергии. Один из них — закон сохранения импульса (или количества движения). Другой — сохранение момента количества движения. Мы узнаем о них больше позже.

В конечном счете, мы не понимаем законов сохранения достаточно глубоко. Нам непонятно сохранение энергии. Мы не понимаем, что такое энергия как таковая. Вы, наверное, уже слышали, что фотоны вылетают порциями и что энергия фотона равняется произведению его частоты на постоянную Планка. Это верно, но поскольку частота света может быть любой, то нет закона, согласно которому энергия фотона должна быть какой-то определенной величины. В отличие от кубиков Дениса, количество энергии может быть любым, по крайней мере, с точки зрения современного уровня знаний. Для нас энергия — это не то, что можно пересчитать, а только лишь математическая величина, очень абстрактная и даже, пожалуй, загадочная. В квантовой механике оказывается, что сохранение энергии очень тесно связано с другим важнейшим свойством мира: *ход вещей не зависит от абсолютного времени*. Мы можем провести эксперимент в определенный момент времени и наблюдать его результат, затем провести тот же эксперимент позже, и он будет проходить точно так же. Абсолютно ли верно

это утверждение или нет, мы не знаем. Мы принимаем, что это положение *абсолютно верно*, добавляем принципы квантовой механики, и тогда можем вывести принцип сохранения энергии. Это очень тонкий и увлекательный вопрос, и его непросто объяснить. Другие законы сохранения тоже связаны друг с другом. Сохранение импульса в квантовой механике ассоциируется с тем утверждением, что не имеет значения, *где* мы проводим эксперимент, результаты всегда будут одинаковы. Так же, как сохранение импульса основывается на независимости от пространства, так независимость от времени отвечает за сохранение энергии и, в конце концов, если мы *повернем* прибор, это тоже ничего не изменит, так что независимость от ориентации в пространстве лежит в основе сохранения *момента количества движения*.

Существуют еще три вида законов сохранения, которые точны, насколько мы сегодня знаем, и которые *гораздо легче* понять, потому что здесь мы имеем дело с постоянными единицами — как бы считаем кубики. Первый из трех — *сохранение заряда*. Он означает только то, что количество положительных зарядов минус количество отрицательных всегда остается неизменным. Вы можете избавиться от положительных зарядов вместе с отрицательными, но в итоге сумма тех и других останется той же. Два другие закона аналогичны первому — один из них называется *сохранением барионов*. Есть ряд таких странных частиц, как, например, нейтроны и протоны, которые называются барионами. Какие бы процессы ни происходили в природе, число барионов на входе и на выходе* всегда остается тем же. И еще один закон называется *сохранением числа лептонов*. Группа частиц под названием лептоны включает электрон, мю-мезон и нейтрино. Антиэлектрон, то есть позитрон, считается как -1 лептон. Подсчет общего числа лептонов в любой реакции показывает, что их число на входе и на выходе никогда не меняется, по крайней мере, насколько нам сейчас известно.

Таковы шесть законов сохранения, три замысловатых затрагивают пространство и время, а три относительно просты, поскольку оперируют целыми числами.

К сохраняемости энергии *доступность* и *полезность* энергии не имеет никакого отношения. В атомах морской воды немало энергии движения, ведь море имеет определенную темпе-

* Если считать антибарион как -1 барион.

ратуру, но невозможно собрать это движение так, чтобы можно было его использовать, не получив энергии откуда-то извне. Так что, хотя мы и знаем, что энергия сохраняется, но энергию, доступную для использования человеком, не так-то легко сохранить. Законы, управляющие количеством доступной энергии, называются *законами термодинамики*, и включают понятие энтропии необратимых термодинамических процессов.

И наконец, несколько замечаний относительно того, откуда мы можем черпать сегодня запасы энергии. Наши источники энергии — это Солнце, дождь, уголь, уран и водород. Солнце производит дождь, а также и уголь, так что и эти два источника в конечном счете сводятся к солнечной энергии. Хотя энергия сохраняется, природа, похоже, об этом не заботится; Солнце выделяет огромное количество энергии, но только одна часть из двух миллиардов попадает на Землю. Природа не теряет энергию, но она вовсе не заботится об этом; она расходует энергию направо и налево. Мы уже научились добывать энергию из урана; мы можем также получать ее из водорода, но пока со взрывами и в опасных формах. Если бы нам удалось взять под контроль термоядерную реакцию, то оказалось бы, что 10 л воды за секунду могут дать столько же энергии, сколько вся электроэнергия, произведенная в Соединенных Штатах. Потока в 600 л в минуту было бы достаточно, чтобы восполнить всю энергию, используемую сегодня в США! Так что теперь дело за физиками, которые должны выяснить, как избавить нас от нехватки энергии. И это, бесспорно, достижимо.



5

Теория тяготения*

Движение планет

В этой главе мы расскажем об одном из самых далеко идущих обобщений человеческого разума. Хотя мы восхищаемся величиим разума, нужно отдать должное также и *природе* — мы благоговейно созерцаем, с каким совершенством она полностью беспрекословно подчиняется такому изящному и такому простому закону — закону тяготения. Что это за закон тяготения? Он заключается в том, что каждый объект во Вселенной притягивается к каждому другому объекту с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. В математической форме это определение можно выразить так:

$$F = G \frac{mm'}{r^2} .$$

Если добавить к этому, что любое тело под действием этой силы ускоряется в направлении ее действия на величину, которая обратно пропорциональна его массе, то способному математику этих сведений достаточно, чтобы вывести все дальнейшие следствия. Однако поскольку вы пока еще не считаетесь настолько талантливыми, мы расскажем вам об этих следствиях более подробно, вооружив вас не только этими двумя аксиомами. Мы вкратце расскажем вам историю открытия закона тяготения и обсудим некоторые выводы, его значение для истории, загадки, которые связаны с этим законом, и некоторые уточнения, внесенные в этот закон Эйнштейном; мы обсудим также

* Глава VII I тома «Фейнмановских лекций по физике». — Прим. перев.

связь этого закона с другими законами физики. Все эти вопросы невозможно уместить в одной главе, но эти темы будут освещены в свое время в надлежащих местах последующих глав.

История начинается с глубокой древности, когда люди наблюдали за движением планет среди звезд и в конце концов пришли к выводу, что они движутся вокруг Солнца, — открытие, позже сделанное заново Коперником. Как *именно* планеты движутся вокруг Солнца и по какой траектории — ответы на эти вопросы потребовали несколько большего времени. В начале XV века были большие дебаты о том, действительно ли планеты вращаются вокруг Солнца или нет. Подход Тихо Браге к этому вопросу отличался от всего, что было предложено раньше, — он считал, что споры о характере движения планет скорее всего разрешатся, если действительные положения планет в пространстве измерить достаточно точно. Если бы измерения точно показывали, как движутся планеты, тогда наверняка стало бы возможно подтвердить ту или иную точку зрения. Это была грандиозная идея — чтобы установить истину, лучше осуществить более точный эксперимент, чем проводить глубокие философские рассуждения. Следуя этой идее, Тихо Браге в течение многих лет изучал положения планет в своей обсерватории на острове Фюн, близ Копенгагена. Он составил объемистые таблицы, которые после смерти Тихо Браге стали предметом изучения математика Кеплера. Кеплер же на основе этих данных извлек прекрасные и удивительные, но при этом простые законы, управляющие движением планет.

Законы Кеплера

Пржде всего, Кеплер установил, что все планеты движутся вокруг Солнца по кривым, имеющим форму *эллипсов*, с Солнцем в одном из фокусов. Эллипс — не просто овал, а особый род кривой. Получить такую кривую можно, используя две булавки, воткнутые в каждом из фокусов, кольцо из веревки или нитки и карандаш. Более точно с математической точки зрения эллипс — это геометрическое место всех точек, сумма расстояний которых от двух фиксированных точек (фокусов) постоянна. Или, если угодно, это окружность, видимая под углом к ее плоскости (рис. 5.1).

Второе наблюдение Кеплера заключалось в том, что планеты движутся вокруг Солнца не с постоянной скоростью, но ускоря-

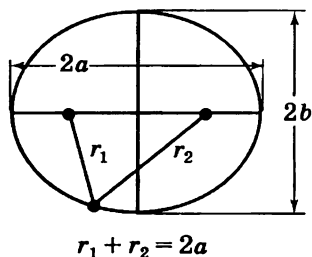


Рис. 5.1. Эллипс

ются, когда они ближе к Солнцу, и замедляются, когда удаляются от него. Допустим, планета наблюдается в два последовательных момента времени, скажем, через неделю, и к каждому наблюдаемому положению планеты проведен радиус-вектор. Орбитальная дуга, пройденная планетой за неделю, и два радиуса-вектора образуют некоторую площадь, заштрихованную на рис. 5.2. Если два таких же наблюдения проводятся с промежутком в неделю в той части орбиты, где планета дальше от Солнца (и где она движется медленнее), то площадь очерченной фигуры будет точно такой же, как в первом случае. Поэтому, согласно второму закону Кеплера, орбитальные скорости каждой планеты таковы, что движущийся радиус «заметает» равные площади за равные промежутки времени.

И, наконец, третий закон был открыт Кеплером гораздо позже. Этот закон совсем иного рода, чем первые два, поскольку он относится не к одной отдельно взятой планете, а описывает их отношение друг к другу. Этот закон гласит, что, если сравнить периоды обращения и размеры орбит любых двух планет, то периоды пропорциональны полуторной степени размеров орбит. В этой формулировке «период обращения» — это время, которое требуется планете, чтобы пройти всю орбиту, а размер

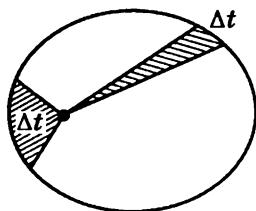


Рис. 5.2. Кеплеров закон площадей

измеряется длиной наибольшего диаметра эллиптической орбиты. Проще говоря, если бы планеты двигались по круговым орбитам, к которым они близки, то время обращения было бы пропорционально полуторной степени диаметра (или радиуса). Итак, три закона Кеплера таковы:

I. Все планеты движутся вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

II. Радиус-вектор от Солнца до планеты «заметает» равные площади в равные промежутки времени.

III. Квадраты времен обращения двух планет пропорциональны кубам больших полуосей их орбит: $T^2 \sim a^3$.

Развитие динамики

В то же время, когда Кеплер открывал эти законы, Галилео Галилей изучал законы движения. Он пытался выяснить, что заставляет планеты двигаться. (В те дни одно из объяснений предполагало, что за каждой планетой находятся невидимые ангелы, которые машут крыльями и толкают планеты вперед. Как вы увидите, сегодня эта теория усовершенствована! Оказалось, что для поддержания планет на орбитах вращения ангелы должны лететь в другом направлении [чем движутся планеты] и обходить без крыльев. В остальном современная теория довольно похожа на ту!) Галилей открыл одно замечательное свойство движения, которое очень помогло в объяснении его законов. Это принцип *инерции*: если тело движется и при этом не подвергается никакому внешнему воздействию, то оно может двигаться вечно по прямой с постоянной скоростью. (*Почему оно продолжает двигаться? Этого мы не знаем, но так уж повелось.*)

Ньютон затем видоизменил это представление, установив, что единственный способ внести изменение в движение тела — приложить *силу*. Если тело ускоряется, это значит, что к нему была приложена сила *в направлении движения*. С другой стороны, если тело изменило *направление*, это значит, что сила была приложена *перпендикулярно*. Таким образом, Ньютон ввел представление, что сила необходима для изменения скорости или *направления* движения тела. Например, если камень привязать к веревке и вертеть им по кругу, то потребуется сила, чтобы удерживать его на окружности. Нужно все время *натягивать* веревку. На самом деле, есть закон, согласно которому

ускорение, производимое силой, обратно пропорционально массе, или иначе: сила пропорциональна массе и ускорению. Чем массивнее тело, тем большую силу надо приложить, чтобы сообщить ему нужное ускорение. (Массу можно измерить, привязав другой камень и вращая им по тому же кругу с той же скоростью. Так можно установить, что более массивные объекты требуют приложения большей силы.) Из этого вытекает одно замечательное следствие: чтобы удерживать планету на орбите, не требуется прилагать никакой касательной силы (ангелам не нужно лететь по касательной), потому что планета и так будет двигаться в этом направлении. Если бы на планету не действовали вообще никакие силы, она вылетела бы с орбиты по прямой линии. Но истинное движение отклоняется от этой линии, при этом отклонение осуществляется под прямым углом к направлению движения, а не в направлении его. Другими словами, благодаря принципу инерции сила, необходимая для удержания планет на орбитах вокруг Солнца, должна действовать не в направлении движения планет вокруг Солнца, а по направлению к Солнцу. (Если сила направлена к Солнцу, то, конечно, само Солнце могло бы быть ангелом!)

Ньютоновский закон тяготения

Лучше других поняв природу движения, Ньютон пришел к предположению о том, что именно *Солнце* могло быть источником или точкой координации сил, управляющих движением планет. Ньютон убедился (возможно, скоро и мы сможем убедиться в этом), что сам факт «заметания» радиусом-вектором равных площадей за равные интервалы времени есть четкое свидетельство того, что отклонение от прямой всегда *радиально* — то есть, закон равных площадей есть прямое следствие того, что все силы направлены точно к *Солнцу*.

Далее, анализируя третий закон Кеплера, можно показать, что, чем дальше планета от Солнца, тем слабее силы. Если сравнивать две планеты, находящиеся на различном расстоянии от Солнца, то анализ показывает, что силы обратно пропорциональны квадратам относительных расстояний. Рассматривая эти два закона в совокупности, Ньютон пришел к выводу, что должна существовать сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния, направленная вдоль линии, соединяющей Солнце и планету.

Обладая выдающимся чутьем к обобщениям, Ньютон, конечно, предположил, что это отношение применимо не только к Солнцу, удерживающему планеты, но что оно носит более общий характер. Например, уже было известно, что вокруг Юпитера вращаются луны, подобно тому, как Луна вращается вокруг Земли, и Ньютон был уверен, что каждая планета силой удерживает свои луны возле себя. Он уже знал к тому времени о силе, притягивающей нас к земле, и предположил, что это *всеобщая сила — что всё притягивается ко всему*.

Следующий вопрос: притягивает ли Земля людей так же, как Луну, то есть, обратно пропорционально квадрату расстояния. Если предмет у поверхности Земли за первую секунду свободного падения из состояния покоя пролетает 4,9 м, то насколько Луна падает за то же время? Можно возразить, что Луна вовсе не падает. Но если бы на нее не действовали никакие силы, она вылетела бы со своей орбиты по прямой линии, а на самом деле она движется по кругу, то есть она *падает* оттуда, где она могла бы быть, не действуя на нее никакой силы. Взяв радиус лунной орбиты (примерно 384 000 км) и период ее обращения вокруг Земли (примерно 29 дней), мы можем подсчитать, насколько Луна падает за 1 секунду*. Это расстояние оказывается примерно 1,36 мм. Это очень близко соответствует закону обратных квадратов, потому что радиус Земли равен 6370 км, и если предмет, находящийся на этом расстоянии от центра Земли, падает на 4,9 м за первую секунду, то предмет на расстоянии 384 000 км, или в 60 раз дальше от центра Земли, упадет только на $\frac{1}{3600}$ от 4,9 м или 1,36 мм. Когда Ньютон захотел проверить эту теорию тяготения подобными расчетами, он провел очень точные вычисления и обнаружил сильнейшие расхождения. Он посчитал свою теорию опровергнутой фактами и не опубликовал свои результаты. Шесть лет спустя новые измерения размера Земли показали, что принятое в ту пору астрономами расстояние до Луны неверно. Когда Ньютон узнал об этом, он снова произвел вычисления с уточненными величинами и получил прекрасное соответствие.

Представление о том, что Луна «падает», выглядит, конечно, несколько странно; почему же она несколько *не приближается* к Земле? Но, как мы уже говорили, все объясняется просто:

* То есть, насколько окружность лунной орбиты отклоняется от касательной к ней в той точке, где Луна находилась секунду назад.

Луна падает в том смысле, что она отклоняется от той прямой линии, по которой она двигалась бы, если бы на нее не действовали никакие силы.

Давайте рассмотрим чисто земной пример. Тело, отпущенное возле земной поверхности, упадет за первую секунду на 4,9 м. Тело, брошенное горизонтально, также упадет на 4,9 м. На рис. 5.3 показано устройство, демонстрирующее это явление. Шарик с определенной скоростью вылетает из горизонтального желоба. Другой шарик падает вертикально с такой же высоты. (Устройство снабжено электрическим реле, которое отпускает второй шарик в тот момент, когда первый соскальзывает с желоба.) Они сталкиваются в воздухе — свидетельство того, что шарики падают на одинаковое расстояние за одинаковое время. Пуля, выпущенная строго горизонтально, может пролететь за одну секунду даже полкилометра, но вниз она упадет за секунду на те же 4,9 м. А что будет, если все больше увеличивать скорость пули? Не будем забывать, что поверхность Земли искривлена. Если скорость пули будет достаточно велика, то, упав на 4,9 м, она может остаться на той же высоте над поверхностью, что и раньше. Как это возможно? Пуля, конечно, все еще падает, но земная поверхность «уходит из-под нее» вследствие своей кривизны, так что пуля «падает» вокруг Земли. Вопрос в том, какое расстояние пуля должна пролететь за 1 секунду, чтобы поверхность земного шара отделилась на 4,9 м? На рис. 5.4 показана Земля с радиусом 6370 км и касательная прямолинейная траектория, по которой пуля двигалась бы в отсутствие всяких внешних сил. Затем, используя замечательную теорему из геометрии, согласно которой длина полухорды, перпендикулярной диаметру, равняется среднему геометрическому двух частей, на которые пересекает диаметр хорда. Значит, горизонталь-

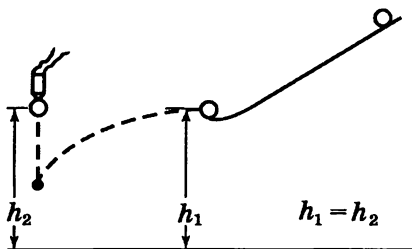


Рис. 5.3. Прибор для демонстрации независимости вертикального и горизонтального движений

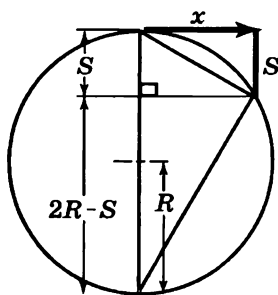


Рис. 5.4. Ускорение к центру на круговой траектории.

По законам планиметрии, $x/S = (2R-S)/x \approx 2R/x$,
 где R — радиус Земли, 6370 км; x — расстояние,
 пролетаемое снарядом «горизонтально» за одну секунду;
 S — расстояние «падения» за 1 с (4,9 м).

ное расстояние, пройденное пулей, равняется среднему геометрическому между 4,9 м падения и 12740 км диаметра Земли. $\sqrt{0,0049 \cdot 12740} \approx 7,9$ км. Таким образом, мы получаем, что пуля, движущаяся со скоростью 7,9 км/с, будет продолжать падать на Землю с той же скоростью 4,9 м/с, но никогда не упадет, потому что поверхность будет удаляться от нее на такое же расстояние. Таким же образом космонавт Гагарин продержался на одной высоте, пролетев вокруг Земли 40000 км со скоростью примерно 8 км в секунду (он двигался немного медленнее, так как находился немного выше).

Любое великое открытие нового закона приносит пользу только в том случае, если он позволяет нам узнать больше, чем мы знали до этого. Так, Ньютон *использовал* второй и третий законы Кеплера, чтобы вывести свой закон тяготения. Что он *предсказал*? Во-первых, его анализ движения Луны: он связал падение предметов на Землю с «падением» Луны. Во-вторых, можно поставить вопрос, *является ли орбита эллиптической*? Позже мы увидим, как можно рассчитать движение с математической точностью, можно доказать, что планеты должны двигаться по эллиптическим орбитам*, так что не требуется больше никаких добавочных фактов, чтобы объяснить *первый* закон Кеплера. Так Ньютон сделал свое первое замечательное предсказание.

* Это доказательство не приводится в настоящем курсе.

Закон тяготения объяснил многие прежде непонятные явления. Например, притяжение Луны является причиной приливов, которые до того были загадкой. Луна притягивает воду под собой и производит приливные волны — люди и раньше задумывались об этом, но не было такого гения, как Ньютон, и думали, что должен быть только один прилив в день. Считалось, что Луна притягивает воду под собой, производя прилив и отлив, Земля вращается, и в результате в каждом месте вода должна раз в сутки подняться и опуститься. А на самом деле прилив бывает каждые 12 часов. Другая школа утверждала, что прилив возникает и на противоположной стороне Земли вследствие того, что Луна отрывает сушу от воды! Обе эти теории неверны. На самом деле механизм таков: притяжение Луной суши и воды «уравновешено» в центре Земли. Но вода, которая находится на «лунной» стороне Земли, притягивается ею *сильнее*, чем среднее притяжение всей Земли, а вода, находящаяся на обратной стороне Земли, — *слабее*. И, главное, вода может перетекать с места на место, тогда как твердая земля — не может. Истинная причина приливов и отливов и определяется этими двумя факторами.

Что мы имеем в виду, говоря «уравновешено»? Что уравновешивается чем? Если Луна притягивает к себе всю Землю целиком, почему тогда Земля не падает «прямо» на Луну? По той же причине, почему и Луна не падает на Землю: Земля вращается по кругу вокруг точки, которая находится внутри нее, но не в ее центре. Не Луна вращается вокруг Земли — они обе движутся вокруг некой центральной точки, причем каждая из них «падает» к этому общему центру, как показано на рис. 5.5. Вращение вокруг общего центра — вот что уравновешивает «падение» их обеих. Так что Земля и сама движется не по прямой линии — она движется по кругу. Вода на дальней от Луны стороне Земли

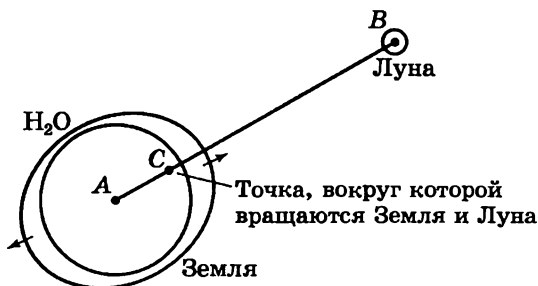


Рис. 5.5. Система Земля-Луна с приливами

отбрасывается из-за «центробежной силы» сильнее, чем центр Земли, который уравновешен притяжением Луны. Вследствие этого нарушения равновесия вода удаляется от центра Земли. На ближней стороне Земли притяжение Луны сильнее, и отклонение от равновесия происходит в противоположную сторону, но, опять же, *от* центра Земли. В итоге мы получаем *два* приливных «горба».

Всемирное тяготение

Что еще можно понять, зная о существовании тяготения? Всем известно, что Земля круглая. А почему она круглая? Разумеется, вследствие тяготения. Шарообразность Земли можно объяснить тем, что все ее части притягиваются друг к другу, так что она притянула сама себя настолько, насколько это было возможно! Если рассуждать дальше, то Земля не является в точности *шаром*, потому что она вращается, а центробежная сила противодействует тяготению на экваторе. Из этого следует, что Земля должна иметь форму эллипсоида, и мы можем даже вычислить точную форму этого эллипсоида. Точно так же из одного только закона тяготения следует, что и Солнце, и Луна, и Земля должны быть (приблизительно) шарами.

Что еще нам дает знание закона тяготения? Наблюдая за спутниками Юпитера, мы можем объяснить все законы их движения. В конце концов, с лунами Юпитера возникла одна сложность, о которой стоит упомянуть. Эти спутники очень подробно изучались Рёмером, который заметил, что они иногда по видимости опережали «график», а иногда отставали от него. (Этот график движения лун можно составить, наблюдая за ними очень долгое время и вычисляя по многим оборотам средний период обращения.) Оказалось, что спутники *опережали* график, когда Юпитер был особенно *близок* к Земле, и *отставали*, когда он был *удален*. Это очень трудно было объяснить с точки зрения закона тяготения — и это могло бы, на самом деле, привести к крушению всей этой превосходной теории, если бы этому не было какого-то другого объяснения. Если закону противоречит хотя бы один случай, то он просто неверен. Но причина этого отклонения оказалась очень простой и красивой: требуется какое-то время, чтобы *увидеть* спутники Юпитера в нужном месте, — именно то время, в течение которого свет проходит расстояние от Юпитера до Земли. Когда Юпитер

находится ближе к Земле, это время немного меньше, а когда дальше — немного больше. Вот почему кажется, что луны то опережают средние показатели своего движения, то отстают от них, в зависимости от того, дальше или ближе они от Земли. Это явление доказало, что свет распространяется не мгновенно, и снабдило нас первой оценкой его скорости. Это было сделано в 1656 г.

Если все планеты притягиваются друг к другу, то сила, которая управляет движением Юпитера вокруг Солнца, — это не только сила притяжения Солнца; есть также притяжение, скажем, Сатурна. Эта сила, конечно, не так велика (Солнце гораздо массивнее Сатурна), но она *есть*, так что орбита Юпитера не может быть точным эллипсом, и она действительно им не является. Она слегка колеблется относительно эллиптической орбиты. Такое движение несколько более сложно для анализа. Тем не менее, были сделаны попытки проанализировать движение Юпитера, Сатурна и Урана на основе закона тяготения. Воздействие каждой из этих планет на другую было точно подсчитано, чтобы установить, можно ли полностью объяснить при помощи этого закона все еще заметные отклонения и неправильности в движении планет. И оказалось, что с Юпитером и Сатурном все в порядке, а вот у Урана обнаружились «причуды». Его движение было весьма специфичным. Он не двигался по точному эллипсу, но это можно было объяснить влиянием Юпитера и Сатурна. Но даже с учетом притяжения этих планет, движение Урана *все равно* не поддавалось объяснению, так что законы тяготения вновь оказались в опасности (возможность эту нельзя было полностью исключить). Два ученых, Адамс в Англии и Леверрье во Франции, независимо друг от друга пришли к другому выводу: возможно, существует *еще одна* планета, темная и невидимая, еще не открытая. Тогда эта планета, назовем ее *N*, могла бы оказывать воздействие на Уран. Они рассчитали, где должна находиться эта планета, чтобы производить наблюдаемые отклонения в орбите Урана. Затем они послали сообщения в соответствующие обсерватории: «Господа, направьте свои телескопы в такую-то точку пространства, и вы увидите новую планету». Часто все зависит от того, с кем мы работаем, — обращают на нас какое-то внимание или нет. Леверрье астрономы послушали; они посмотрели, и обнаружили планету *N* там, где было предсказано! Тогда и в другой обсерватории тоже очень быстро провели такое же наблюдение, и тоже увидели ее.

Это открытие показывает, что законы Ньютона абсолютно верны для Солнечной системы; но верны ли они на расстояниях, больших, чем относительно малые расстояния до планет? Первое, что требуется проверить, — притягивают ли *звезды друг друга* так же, как планеты? Положительные доказательства этого дают *двойные звезды*. На рис. 5.6 показана двойная звезда — две звезды, расположенные очень близко друг к другу (на рисунке есть еще третья звезда, так что мы точно знаем, что фотография не перевернута). Вторая фотография сделана спустя несколько лет. Мы видим, что, относительно «фиксированной» звезды, ось пары несколько повернута, то есть, две звезды ходят вокруг друг друга. Подчиняется ли это движение законам Ньютона? Тщательные измерения относительного положения двойной звезды Сириус показаны на рис. 5.7. Здесь мы видим прекрасный эллипс, при том, что измерения были начаты в 1862 г. и продолжались до 1904-го (к настоящему времени система прошла бы еще один полный круг). Все соответствует законам Ньютона, кроме того, что Сириус А получается *не в фокусе*. По какой причине? Потому что плоскость эллипса не совпадает с «плоскостью неба». Мы видим Сириус не под прямым углом к плоскости орбиты, а если на эллипс посмотреть сбоку, он останется эллипсом, но его фокус сместится. Так мы можем анализировать двойные звезды, вращающиеся вокруг друг друга, в соответствии с требованиями закона тяготения.

Что закон тяготения справедлив и для еще больших расстояний, можно видеть на рис. 5.8. Кто не видит здесь действия тяготения, у того нет воображения. На этом рисунке изображено одно из самых замечательных небесных явлений — шаровое звездное скопление. Каждая точка — это звезда. Хотя кажется,

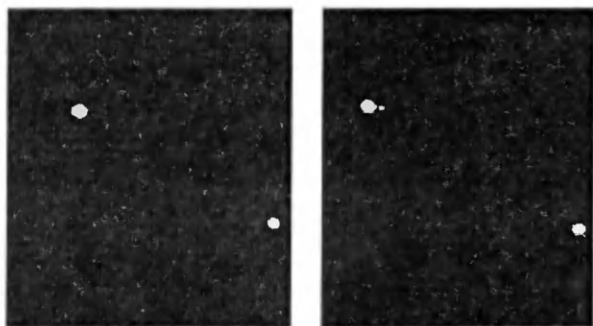


Рис. 5.6. Система двойной звезды

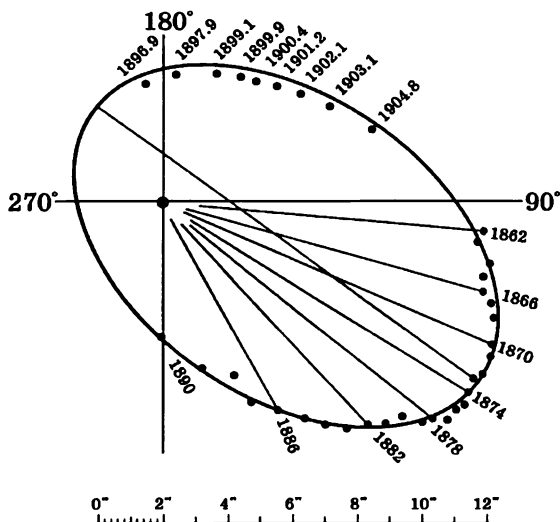


Рис. 5.7. Орбита Сириуса В относительно Сириуса А

что они сливаются в центре, это лишь следствие слабой чувствительности телескопа. На самом деле, расстояния даже между самыми центральными звездами очень велики, и они очень редко сталкиваются между собой. Во внутренних областях скопления звезд больше, и чем дальше от центра, тем меньше их становится. Очевидно, что между этими звездами действует сила

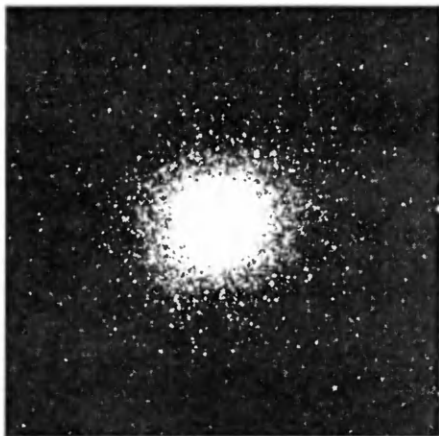


Рис. 5.8. Шаровое звездное скопление

тяготения. Несомненно, тяготение существует и на этих невообразимо больших расстояниях — возможно, в 100 000 раз превышающих размеры нашей Солнечной системы.

Давайте пойдем еще дальше и посмотрим на *всю галактику* (рис. 5.9). Очертания этой галактики явно свидетельствуют о стремлении ее вещества стянуться. Конечно, мы не можем доказать, что и здесь действует точный закон обратных квадратов, а только то, что здесь, на этих огромных расстояниях, существует притяжение, которое удерживает вместе всю систему. Кто-то может сказать: «Да, все это здорово, но почему тогда галактика не похожа на шар?» Потому что она *вращается* и имеет *момент количества движения*, который не уменьшится при ее сжатии; ей остается только сплюснуться. (Впрочем, вот вам хорошая задача: как образуются рукава галактики? Чем определяется ее форма?) Ясно, что очертания галактики формируются под действием сил тяготения, хотя сложность ее структуры пока невозможно полностью проанализировать. Размер галактики примерно от 50 000 до 100 000 световых лет, в то время как расстояние от Земли до Солнца — $8\frac{1}{2}$ световых *минут*, так что вы можете видеть, насколько огромны эти расстояния.

Тяготение проявляется и на *бóльших* протяжениях, как показано на рис. 5.10, где изображено скопление множества «миниатюрных» объектов. Это *скопление галактик*, подобное звездному скоплению. Галактики и на таких расстояниях также



Рис. 5.9. Галактика



Рис. 5.10. Скопление галактик

притягиваются друг к другу, иначе бы они не собрались в «кучу». Возможно, тяготение существует даже на расстояниях в *десятки миллионов световых лет*; и, насколько мы можем судить сегодня, всюду все еще действует закон обратных квадратов.

Исходя из закона тяготения, мы можем не только постичь туманности, но и получить некоторое представление о происхождении звезд. Если взять большое газово-пылевое облако, подобное изображенному на рис. 5.11, то притяжение частиц пыли соберет их в небольшие комочки. На рисунке едва видны «маленькие» черные точки, которые могут быть начальными формами скоплений газа и пыли, — а из них, под действием притяжения, начинают образовываться звезды. Приходилось ли нам хоть раз наблюдать рождение звезды, вопрос спорный. На рис. 5.12 изображено одно из свидетельств в пользу того, что приходилось. Слева показан светящийся газ, а внутри него несколько звезд. Этот снимок был сделан в 1947 г. Справа — другой снимок, полученный всего лишь 7 лет спустя, на котором видны еще два новые яркие пятна. Действительно ли газ сконцентрировался и тяготение стало достаточно сильным, чтобы собрать его в шар, настолько большой, что в нем начались внутризвездные ядерные реакции, превращая его в звезду? Может быть, так, а может быть, и нет. Маловероятно, что всего лишь за 7 лет нам посчастливилось увидеть превращение звезды в ви-



Рис. 5.11. Межзвездное пылевое облако

димую форму; и еще менее вероятно, чтобы мы увидели рождение сразу *двух* звезд.

Эксперимент Кавендиша

Итак, тяготение распространяется на огромные расстояния. Но если существует сила притяжения между *любыми* двумя объектами, то мы должны иметь возможность измерить эту силу, действующую между ними. Вместо того, чтобы наблюдать за движением звезд, почему бы нам не взять свинцовый шар и кусок мрамора и не посмотреть, будет ли мрамор притягиваться к свинцу? Трудность столь простого по идее эксперимента заключается в слабости действующей силы. Такой опыт должен проводиться с множеством предосторожностей, то есть, из аппарата нужно выкачать воздух, убедиться в отсутствии в нем электрических зарядов и т. д.; лишь тогда силу можно измерить. Этот опыт впервые был успешно проведен Кавендишем при помощи устройства, схематично изображенного на рис. 5.13. Он впервые показал наличие непосредственного взаимодействия между двумя большими неподвижными свинцовыми шарами и двумя маленькими свинцовыми шариками, закрепленными на концах коромысла, подвешенного на очень тонкой упругой нити. Измеряя, насколько скручивается нить,

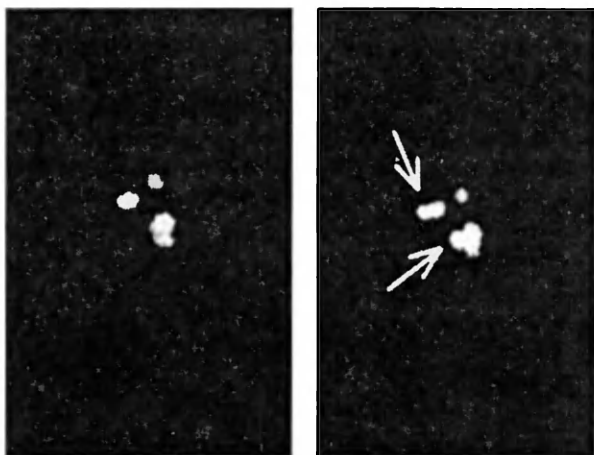


Рис. 5.12. Образование новых звезд?

можно измерить величину силы и удостовериться, что она обратно пропорциональна квадрату расстояния. Таким образом, можно достаточно точно определить коэффициент G в формуле

$$F = G \frac{mm'}{r^2}.$$

Все массы и расстояния здесь известны. Вы скажете: «Мы знали это и раньше для Земли». Да, но мы не знали *массы* Земли. Вычислив G при помощи этого эксперимента, и зная, с какой силой Земля притягивает предметы, мы можем косвенным образом определить массу Земли! Этот эксперимент был назван «взвешиванием Земли». Кавендиш заявил, что он взвесил Землю, но в действительности он только измерил коэффициент G . Но это единственный способ, которым можно измерить массу Земли. Оказывается, что G равняется

$$6,670 \times 10^{-11} \text{ Ньютон} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Трудно преувеличить значение этого великого достижения в теории тяготения для истории науки. На смену запутанности, недостатку уверенности, неполному знанию, которые преобладали в прежние века, когда не прекращались споры и не переводились парадоксы, пришла ясность и простота этого закона —

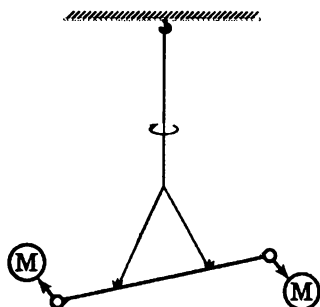


Рис 5.13. Упрощенная схема прибора, использованного Кавендишем для проверки закона всемирного тяготения для малых тел и измерения постоянной тяготения G

было установлено, что все звезды, планеты и их спутники подчиняются настолько *простому правилу*, и человек способен *понять* это правило и точно предсказывать движение планет! Это стало толчком для успехов науки в последующие годы, так как внушало надежду, что и другие явления природы могут иметь столь же замечательно закономерности.

Что такое тяготение?

Но действительно ли этот закон так прост, как кажется? Как он работает? Все, что мы выяснили, — лишь то, *как* Земля обращается вокруг Солнца, но мы не сказали, *что движет* ее. Ньютон не выдвигал никаких гипотез на этот счет; ему было достаточно открыть, *каким образом* Земля движется в пространстве, и он не углублялся в механизм действия открытого им закона. *С тех пор и до наших дней никому так и не удалось разгадать этот механизм.* Законам физики свойствен такой абстрактный характер. Так, закон сохранения энергии — это теорема о величинах, которые нужно вычислить и сложить вместе, но он не говорит ничего о том, что такое энергия как таковая; точно так же великие законы механики — это количественные математические закономерности, механизм действия которых неизвестен. Почему мы можем математически описывать мир, не зная природы происходящих процессов? Этого никто не знает. Но мы продолжаем продвигаться вперед по этому пути, потому что он очень плодотворен для познания.

Для объяснения тяготения предлагалось множество гипотез. Интересно рассмотреть одну из них, к которой многие ученые возвращались время от времени. Поначалу, когда наталкиваются на это объяснение, оно кажется превосходным, но скоро обнаруживается, что тут что-то не так. Впервые оно было предложено в 1750 г. Представьте, что все пространство заполнено множеством частиц, движущихся во всех направлениях с огромными скоростями, которые лишь в небольшой степени поглощаются веществом. Поглощаясь, они сообщают свой импульс Земле. Однако поскольку равное количество частиц движется в ту и в другую сторону, все импульсы уравниваются. Но если Солнце находится относительно неподалеку, то частицы, движущиеся к Земле сквозь Солнце, частично им поглощаются, так что со стороны Солнца их поступает меньше, чем с обратной стороны. Поэтому Земля получает суммарный импульс в направлении Солнца, и нетрудно вычислить, что этот импульс обратно пропорционален квадрату расстояния, — именно таков закон изменения пространственного угла, под которым видно Солнце, с изменением расстояния. Чем же плохо это объяснение? Оно влечет за собой некоторые следствия, которые *не соответствуют действительности*. Появляется следующая трудность: Земля, двигаясь вокруг Солнца, должна испытывать больше столкновений с этими частицами с передней стороны, чем с задней (когда вы бежите под дождем, то в лицо попадает больше дождя, чем в затылок!) Поэтому Земле сообщался бы дополнительный импульс с передней стороны, и Земля испытывала бы *сопротивление* своему движению, а это сказалось бы на замедлении ее движения по орбите. Можно даже вычислить, через какое время Земля должна была бы полностью остановиться из-за этого сопротивления; оказывается, это время не так уж велико; а раз Земля все же движется по своей орбите, то вся эта механика не годится. Все предложенные до сих пор объяснения тяготения предполагают также явления, которых *нет* в действительности.

Теперь давайте обсудим возможную связь тяготения с другими силами. На данный момент не удастся свести тяготение к другим силам. Оно не является проявлением электричества или чем-нибудь в этом роде, этим его не объяснишь. Однако тяготение похоже на другие силы, и интересно посмотреть чем. Например, сила электричества между двумя заряженными телами выглядит точно так же, как тяготение: электрическая сила равняется константе с отрицательным знаком, помножен-

в нем одним из корней будет эта константа. Очень трудно найти уравнение, для которого такое фантастическое число было бы естественным корнем. Были также придуманы и другие возможности; одна из них — связать эту константу с возрастом Вселенной. Ясно, что для этого нам нужно найти в природе *еще одно* огромное число. Но значит ли это, что мы должны измерять возраст вселенной *в годах*? Нет, потому что год — не «естественная» единица измерения; ее придумали люди.

Как пример естественной единицы давайте рассмотрим время, за которое свет проходит сквозь протон, 10^{-24} с. Разделив это число на возраст Вселенной (2×10^{10} лет), мы получим примерно 10^{-42} . Количество нулей в знаменателе примерно такое же, поэтому было предположено, что постоянная всемирного тяготения связана с возрастом Вселенной. Если бы это действительно было так, она менялась бы со временем, потому что по мере старения Вселенной отношение ее возраста к времени прохождения света сквозь протон постепенно возрастало бы. Возможно ли, что постоянная тяготения *действительно* меняется со временем? Конечно, эти изменения были бы настолько малы, что их почти невозможно зафиксировать.

Один из способов проверить эту мысль — определить, что должно было измениться за последние 10^9 лет (время появления жизни на нашей Земле), т. е. за $1/10$ возраста Вселенной. За это время постоянная тяготения возросла бы примерно на 10 процентов. Но оказывается, что, если мы рассмотрим структуру Солнца — соотношение между массой составляющего его вещества и скоростью, с которой внутри него производится энергия излучения, — то при росте тяжести 10% Солнце было бы ярче гораздо больше, чем на 10% — пропорционально *шестой степени* постоянной тяготения! Если мы вычислим, что произошло бы с орбитой Земли при этом изменении, то обнаружим, что Земля *приблизится* к Солнцу. В общем и целом Земля стала бы на 100° горячее, и вся вода испарилась бы в атмосферу, морей бы не существовало, поэтому жизнь не могла бы зародиться в океане. Так что мы сейчас *не верим*, что постоянная тяготения изменяется с возрастом Вселенной. Но те аргументы, которые были сейчас приведены, не очень убедительны, поэтому вопрос остается открытым.

Как известно, сила тяготения пропорциональна *массе*, т. е. мере *инерции* — того, насколько трудно удержать вращающееся по кругу тело. Поэтому два тела, тяжелое и легкое, вращающиеся

ся вокруг массивного тела по одной и той же траектории с одной и той же скоростью под действием силы тяготения, останутся вместе, потому что движение по кругу *требует* большей силы для удержания большей массы. Поэтому соотношение между силой тяжести и массой двух тел будет *постоянным*, и два тела будут продолжать вращаться вместе. Если одно тело находится *внутри* другого, то оно там и *останется*; это равновесие считается совершенным. Вот почему Гагарин и Титов наблюдали «невесомость» предметов внутри космического корабля; если бы они отпустили за пределы корабля, например, кусок мела, то он вращался бы вокруг Земли точно так же, как и весь космический корабль, поэтому он казался бы подвешенным в пустоте рядом с кораблем. Очень интересно, что эта сила пропорциональна массе с *высокой точностью*, потому что если бы это было не так, то наблюдались бы явления, в которых масса и инерция отличаются. Отсутствие таких явлений было проверено с огромной точностью в эксперименте, проведенном впервые Этвешем в 1909 г. и повторенном позже Дикке. Для всех веществ, подвергнутых испытанию, масса и вес пропорциональны с точностью $1/10^9$ или большей. Это замечательный эксперимент.

Тяготение и относительность

Еще один вопрос, достойный обсуждения, — видоизменение Эйнштейном ньютоновского закона тяготения. Несмотря на все воодушевление, которое было вызвано этим законом, он оказался все же неверен! Эйнштейн внес в него изменения, чтобы согласовать его с теорией относительности. По Ньютону, тяготение действовало мгновенно: то есть, если мы передвигаем массу, то в тот же момент мы должны зафиксировать изменение силы вследствие нового положения массы; таким способом мы могли бы посылать сигналы с бесконечной скоростью. Эйнштейн выдвинул доводы, согласно которым *невозможна передача сигналов со скоростями, большими скорости света*, следовательно, закон тяготения не является верным. Внеся в него поправки с учетом задержки, мы получаем новый закон, именуемый эйнштейновским законом тяготения. Одну из особенностей этого нового закона очень легко понять: в эйнштейновской теории относительности любой объект, обладающий *энергией*, обладает и массой в том смысле, что он притягивается к другим объектам. Даже световой луч имеет «массу», ибо он обладает энер-

гией. Когда световой луч, обладающий определенной энергией, проходит мимо Солнца, то Солнце его притягивает, так что луч уже движется не по прямой линии, а искривляется. Во время солнечного затмения, например, звезды, видимые вблизи солнечного диска, кажутся смещенными по сравнению с их положением на небе в отсутствие Солнца, и это смещение действительно было обнаружено наблюдением.

В заключение давайте сопоставим тяготение с другими теориями. В последние годы было установлено, что вся масса состоит из мельчайших частиц, и что существует несколько видов взаимодействий, таких как ядерные силы и т. д. Тяготение пока не удалось объяснить при помощи этих ядерных или электрических сил. Квантовомеханические стороны природы мы еще не распространили на тяготение. Когда на малых расстояниях проявляются квантовомеханические эффекты, тяготение оказывается так слабо, что потребность в квантовой теории тяготения еще не возникла. С другой стороны, с точки зрения согласованности и последовательности наших физических законов, было бы очень важно установить, должен ли закон Ньютона, видоизмененный Эйнштейном, быть изменен с тем, чтобы согласовать его с принципом неопределенности. Это последнее видоизменение пока еще не удалось осуществить.



Квантовое поведение

Атомная механика

В последних нескольких главах мы рассмотрели понятия, без которых невозможно разобраться ни в явлении света, ни в электромагнитном излучении в целом. (Несколько специфических вопросов мы оставили до будущих времен. В частности, коэффициент преломления плотных сред и полное внутреннее отражение.) То, с чем мы имели дело до сих пор, — это «классическая теория» электрических волн, которая оказывается достаточно точной для описания природы огромного числа эффектов. До сих пор мы могли не принимать в расчет то обстоятельство, что свет излучается «порциями», или фотонами.

Мы хотели бы сделать следующим предметом нашего рассмотрения проблему поведения относительно крупных массивов вещества — их механические или тепловые свойства, например. Разбирая эти свойства, мы обнаружим, что «классическая» (или просто более старая) теория опровергается почти немедленно, потому что вещество в действительности состоит из частиц атомных размеров. И все же мы будем пользоваться только классической частью, поскольку это все, что мы можем понять, используя классическую механику, которой до сих пор занимались. Но нам не стоит рассчитывать на особенный успех. Окажется, что теорию вещества, в отличие от теории света, гораздо труднее понять с точки зрения классических представлений. Мы могли бы, конечно, старательно обходить все атомные эффекты, но вместо этого лучше вставим сюда краткий экскурс в основные представления о квантовых свойствах вещества, то есть, квантовые представления атомной физики, чтобы

* Глава 37 из III тома «Фейнмановских лекций по физике». — Прим. перев.

вы могли хоть немного почувствовать то, что нам придется оставить в стороне. Поскольку нам придется обходить стороной некоторые очень важные предметы, с которыми мы неизбежно столкнемся.

Итак, мы сейчас перейдем к *введению* в предмет квантовой механики, но на самом деле мы не сможем заняться этим предметом по-настоящему еще очень долго.

«Квантовая механика» — это описание поведения мельчайших частиц вещества и, в частности, того, что происходит в атомных масштабах. Тела очень малого размера ведут себя совершенно непохоже на все то, что доступно нашему непосредственному опыту. Они ведут себя ни как волны, ни как частицы, ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как гирьки на чашках весов, и ни как вообще что-либо, виденное вами.

Ньютон полагал, что свет состоит из частиц, но потом было установлено, как мы видели выше, что он ведет себя как волна. Позже, однако, (в начале двадцатого столетия), обнаружилось, что в некоторых случаях свет действительно ведет себя как частица. Электрон же, наоборот, сначала считался частицей, а затем оказалось, что во многих отношениях он ведет себя подобно волне. Так что в действительности его поведение ни то, ни другое. Теперь мы сдались. Мы говорим: «Он *ни на что* не похож».

К счастью, есть, однако, одно исключение: электрон ведет себя подобно свету. Квантовое поведение атомных объектов (электронов, протонов, нейтронов, фотонов и т. д.) одинаково для всех; всех их можно назвать «волновыми частицами», или как вам будет угодно их называть. Так что свойства, установленные нами для электрона (который мы будем брать в качестве иллюстрации для наших примеров), будут иметь силу и для всех остальных «частиц», в том числе и фотонов света.

На протяжении первой четверти двадцатого века постепенное накопление сведений о поведении атомов и других мельчайших частиц и знакомство с этим поведением вызывало растущее недоумение вплоть до тех пор, пока оно не было разрешено в 1926–1927 гг. работами Шрёдингера, Гейзенберга и Борна. Им в конце концов удалось построить непротиворечивое описание поведения вещества атомных размеров. В данной главе мы обсудим главные черты этого описания.

Поскольку поведение атомов столь непохоже на наш обыденный опыт, то с ним очень трудно освоиться. Оно кажется причудливым и непостижимым не только для новичка, но и для

опытного физика. Даже специалисты не понимают эти явления так, как им хотелось бы, и это очень легко объяснимо, поскольку весь наш непосредственный опыт и человеческая интуиция применимы только к крупным телам. Мы знаем, как поведут себя крупные объекты, но объекты микромира будут вести себя совершенно иначе. Так что нам придется подходить к ним лишь при помощи абстракции и воображения и не связывать их с нашим повседневным опытом.

В этой главе мы приступим сразу же к основной составляющей этого непостижимого поведения в его наиболее странной форме. Мы рассмотрим явление, которое невозможно, ну *абсолютно* невозможно объяснить каким бы то ни было классическим образом, и в котором заключена суть квантовой механики. На самом деле это явление имеет только *одну* тайну. Мы не можем раскрыть ее в том смысле, что не можем «объяснить», как это происходит. Мы можем просто *рассказать* вам, как она работает, и при этом мы познакомим вас с основными особенностями квантовой механики.

Эксперимент с пулеметной стрельбой

Пытаясь понять квантовое поведение электронов, мы сопоставим их поведение в одном и том же эксперименте с более знакомым нам поведением частиц, скажем, пуль, выпущенных из пулемета, и с поведением обычных волн в водной среде. Рассмотрим вначале поведение пуль в эксперименте, схематически изображенном на рис. 6.1. У нас имеется пулемет, который выстреливает поток пуль. Это не очень точное оружие, поэтому он покрывает пулями (случайным образом) довольно широкий угол, как показано на рисунке. Перед пулеметом находится стена (сделанная из толстого листа брони), в которой проделаны два отверстия ровно такого размера, чтобы через каждое из них могла пройти пуля. За первой стеной находится вторая — скажем, толстая деревянная стена, которая «поглотит» все пули, попадающие в нее. Перед этой второй стеной находится некоторый предмет, который мы будем называть «детектором» пуль. Например, это может быть ящик с песком. Любая пуля, попав в детектор, застрянет в нем. При желании мы можем высыпать содержимое ящика и сосчитать число пуль, попавших в него. Детектор может двигаться взад и вперед (в направлении x). При помощи этого аппарата мы можем экспериментально ответить

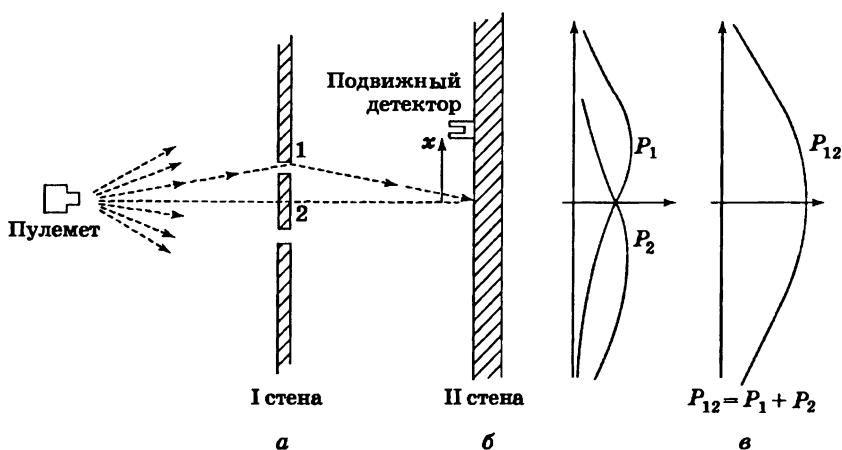


Рис. 6.1. Интерференционный эксперимент с пулями

на вопрос: «Какова вероятность того, что пуля, проходящая через дыру в первой стене, попадет во вторую на расстоянии x от середины?» Имейте в виду, что мы говорим о вероятностях, потому что мы не знаем точно, куда попадет каждая отдельно взятая пуля. Пуля, которая попадет в дырку, может срикошетить об ее стенки и попасть вообще куда угодно. Под «вероятностью» мы имеем в виду шанс попасть пулей в детектор. Это мы можем измерить, подсчитав количество пуль, попавших туда за определенный промежуток времени, а затем поделив это число на количество всех пуль, застрявших за то же время во второй стене. Или, полагая, что скорость стрельбы была одинакова в течение всего эксперимента, искомая вероятность будет точно пропорциональна количеству пуль, попавших в детектор за установленное время.

Для наших целей было бы удобно представить себе несколько идеализированный эксперимент, в котором пули были бы *не разрушаемыми* — не могли бы разламываться. В таком эксперименте мы всегда находили бы в детекторе только целые пули. Если скорость стрельбы пулемета сделать очень низкой, то окажется, что за определенное время либо ничего не накапливается, либо одна — и только одна — пуля попадает в глухую стену. И, конечно, размер пули не зависит от скорости стрельбы. Поэтому можно сказать: «Пули *всегда* попадают в детектор равны-

ми порциями». При помощи нашего детектора мы измеряем только вероятность поступления очередной порции, как функцию от x . Результат такого измерения при помощи описанного аппарата (мы еще не проделали сам эксперимент, поэтому мы просто представляем себе его результат) показан на графике рис. 6.1, в. На этом графике вероятность отложена по горизонтальной оси, а ось x — вертикальна, согласуясь с движением детектора. Мы обозначили вероятность P_{12} , потому что пули могут поступать либо через отверстие 1, либо через отверстие 2. Неудивительно, что величина P_{12} велика у середины графика и уменьшается по краям. Впрочем, вас может удивить, что максимум вероятности приходится на $x = 0$. Можно легко объяснить это, если повторить эксперимент, закрыв отверстие 2, а потом повторить еще раз, закрыв отверстие 1. Когда отверстие 2 закрыто, пули могут проходить лишь через отверстие 1, и мы получаем кривую, обозначенную P_1 (рис. 6.1, б). Как и следовало ожидать, максимум P_1 приходится на x , находящееся по прямой от пулемета через отверстие 1. Когда закрыто отверстие 1, мы получаем симметричную кривую P_2 — это распределение вероятностей для пуль, проходящих через отверстие 2. Сравнивая части (б) и (в) рисунка 6.1, мы приходим к важному результату:

$$P_{12} = P_1 + P_2, \quad (6.1)$$

т. е. вероятности просто складываются. Вероятность в том случае, когда открыты оба отверстия, равняется сумме вероятностей для каждого из отверстий по отдельности. Этот результат мы назовем *«отсутствием интерференции»* по причине, о который вы узнаете позже. О пулях достаточно. Они поступают в детектор порциями, и вероятность их поступления свидетельствует об отсутствии интерференции.

Эксперимент с волнами

Теперь давайте рассмотрим аналогичный эксперимент с волнами на воде. Прибор для такого эксперимента показан схематически на рис. 6.2. Это мелкий лоток с водой. Небольшой объект, обозначенный как «источник волн», колеблется вверх и вниз при помощи моторчика и производит круговые волны. Справа от источника снова стена с двумя отверстиями, а за ней — вторая стена, которую, для простоты, будем считать «по-

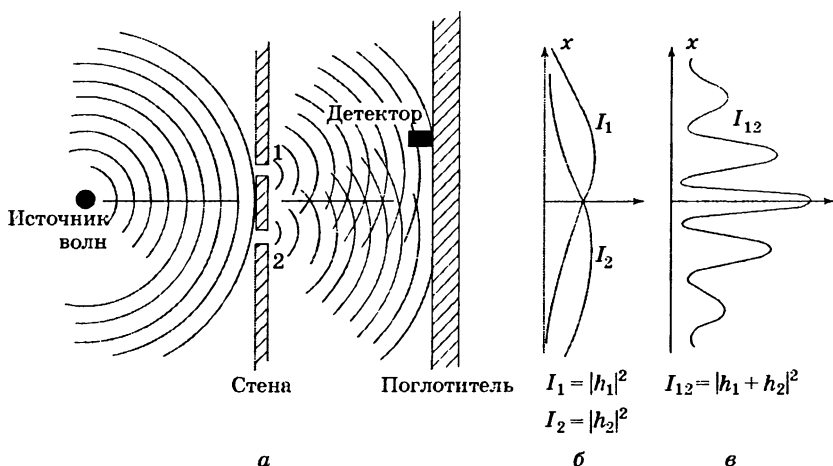


Рис. 6.2. Интерференционный эксперимент с волнами на воде

глотителем», то есть от нее не отражаются никакие волны: насыпан песчаный «пляж» под малым углом наклона. Перед этим пляжем, как и раньше, разместим детектор, который может передвигаться вперед-назад по оси x , как и раньше. В данном случае детектор — это устройство, измеряющее «интенсивность» волнового движения. Можете представить себе приспособление, измеряющее высоту волн, но при этом его шкала откалибрована пропорционально *квадрату* высоты, так что показания прибора могут давать интенсивность волны. А, следовательно, детектор будет определять также *энергию*, переносимую волной, или, точнее, долю энергии, поступающей в детектор.

В этом эксперименте нужно в первую очередь учесть, что интенсивность может быть *любой* величины. Если источник волн лишь слегка движется с небольшой амплитудой, то детектор обнаружит только небольшое волновое движение. Чем больше движение источника, тем больше фиксируемая интенсивность. Интенсивность волны может иметь вообще любое значение. Нельзя сказать, что в ней есть хоть какая-то «порционность».

Теперь давайте измерим волновую интенсивность для различных значений x (поддерживая движение источника волн все время на одном и том же уровне). Теперь мы получим очень интересного вида кривую, обозначенную I_{12} на рис. 6.2, в.

Мы уже знаем, как может возникать подобная картина, на примере интерференции электромагнитных волн. В этом случае мы наблюдали бы, что в отверстиях происходит дифракция исходящей от источника волны, и каждое из отверстий становится источником новых круговых волн. Если мы будем закрывать по очереди каждое из отверстий и измерять распределение интенсивности в детекторе, то получим довольно простые кривые интенсивности, показанные на части (б) нашего рисунка. I_1 — это интенсивность волны, исходящей из отверстия 1 (мы получаем ее, проводя измерения при закрытом отверстии 2), а I_2 — это интенсивность волны из отверстия 2 (при закрытом отверстии 1).

Интенсивность I_{12} , наблюдаемая, когда оба отверстия открыты, явно не является суммой I_1 и I_2 . Мы говорим, что имеет место *интерференция* (наложение) двух волн. В некоторых точках (в которых кривая I_{12} имеет свои максимумы) волны совпадают по фазе, и волновые пики складываются, давая большую амплитуду и, следовательно, большую интенсивность. В таких случаях говорится о «конструктивной интерференции» волн. Такая интерференция будет наблюдаться во всех точках, в которых расстояние от детектора до одного из отверстий отличается на целое число длин волн от расстояния до другого отверстия.

В тех местах, где две волны поступают в детектор со сдвигом фаз π (т. е. находятся «в противофазе»), движение волны представляет собой разность двух амплитуд. В таких случаях будет наблюдаться «деструктивная интерференция», и мы получим низкие значения волновой интенсивности. Это бывает только там, где расстояние между детектором и отверстием 1 отличается от расстояния между детектором и отверстием 2 на нечетное число полудлин волн. Низкие значения I_{12} на рис. 6.2 соответствуют местам, где происходит «деструктивная интерференция» двух волн.

Вспомните, что количественное отношение между I_1 , I_2 и I_{12} можно выразить следующим образом: высота волны в детекторе от отверстия 1 может быть записана как (действительная часть) $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$, где амплитуда $\hat{h}_1$ есть, вообще говоря, комплексное число. Интенсивность пропорциональна среднему квадрату высоты или, используя комплексные числа, $|\hat{h}_1|^2$. Подобным же образом для отверстия 2 высота волны равняется $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$, а интенсивность

пропорциональна $|\hat{h}_2|^2$. Когда открыты оба отверстия, высоты волн складываются и дают высоту $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2)e^{i\omega t}$ и интенсивность $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$. Опуская пока не интересующий нас множитель пропорциональности, получаем следующие отношения для интерферирующих волн:

$$I_1 = |\hat{h}_1|^2, \quad I_2 = |\hat{h}_2|^2, \quad I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2. \quad (6.2)$$

Легко заметить, что этот результат весьма отличается от результата, полученного в опыте с пулями (уравн. 6.1). Если мы раскроем скобки в $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$, то увидим, что

$$|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2|\hat{h}_1||\hat{h}_2|\cos\delta, \quad (6.3)$$

где δ — разность фаз между $\hat{h}_1$ и $\hat{h}_2$. Вводя интенсивности из (6.2), получаем

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta. \quad (6.4)$$

Последний член в уравнении (6.4) — так называемый «интерференционный член».

На этом с волнами закончим. Интенсивность их может иметь любые значения, и между ними возникает интерференция.

Эксперимент с электронами

Теперь представим себе аналогичный эксперимент с электронами. Он представлен схематически на рис. 6.3. Мы будем использовать электронную пушку, состоящую из вольфрамовой спирали, нагретой электрическим током и помещенной в металлический корпус с отверстием в нем. Если на проволоку подано отрицательное напряжение, а на корпус — положительное, то электроны, испущенные проволокой, будут ускоряться стенками корпуса, и некоторые из них проскочат через отверстие. Все электроны, выпускаемые пушкой, будут иметь (приблизительно) одинаковую энергию. Напротив пушки снова поместим стену (просто тонкую металлическую пластину) с двумя отверстиями. За ней разместим еще одну пластинку, которая будет поглощать все электроны. Перед второй стеной поместим подвижный детектор. Это может быть счетчик Гейгера или, по-

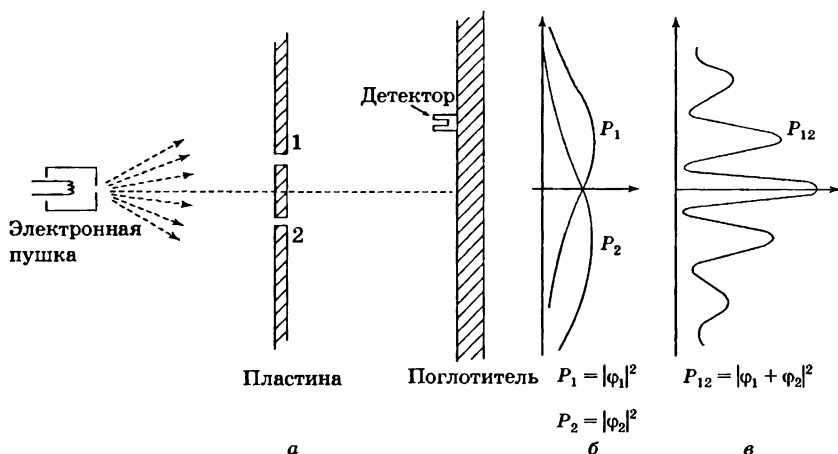


Рис. 6.3. Интерференционный эксперимент с электронами

жалуй, лучше — электронный умножитель, присоединенный к динамике.

Сразу должен предупредить вас: не пытайтесь самостоятельно провести этот эксперимент (в отличие от двух предыдущих, которые вы могли бы провести сами). Этот эксперимент никогда не проводился так, как мы здесь его описываем. Трудность заключается в том, что прибор должен иметь чересчур миниатюрные размеры для получения интересующих нас эффектов. То есть, мы производим лишь «мысленный эксперимент», потому что так легче его обдумать. Мы знаем, какие результаты *дал бы* этот эксперимент, потому что уже *проделано* много опытов на приборах, размеры и пропорции которых давали возможность наблюдать такие эффекты.

Первое, с чем мы сталкиваемся в эксперименте с электронами, — то, что мы слышим отрывистые «щелчки» из детектора (то есть, из динамика), причем все щелчки одинаковой громкости. *Нет* никаких «полущелчков».

Мы замечаем также, что щелчки возникают очень нерегулярно. Что-то наподобие щелк щелк-щелк . . . щелк. щелк щелк-щелк. щелк . . . и т. д. — очень похоже на звук действующего счетчика Гейгера, который вы вероятно слышали. Если подсчитать количество щелчков за достаточно длительное время — скажем, за несколько минут — а затем

подсчитать еще раз за такой же период, то окажется, что эти два числа отличаются друг от друга очень незначительно. Поэтому мы можем говорить о *средней частоте* возникновения щелчков (столько-то щелчков в минуту в среднем).

Перемещая детектор, мы обнаружим, что *частота* щелчков то растет, то падает, в то время как размер (громкость) каждого щелчка остается всегда одинаковой. Если мы охладим проволоку в электронной пушке, то частота щелчков понизится, но громкость щелчков останется неизменной. Кроме этого, мы бы заметили, что, поместив два независимых детектора на задней стенке, мы бы слышали щелчки от одного *либо* от другого из них, но никогда от обоих вместе. (За исключением тех редких случаев, когда два щелчка на разных детекторах происходят с такой малой разницей во времени, что для нашего слуха они сливаются в один звук.) Из этого мы заключаем: что бы ни поступало в детектор, оно поступает туда «порциями». Все «порции» имеют одинаковый размер: поступают только целые «порции», в каждый момент в поглотитель попадает только одна порция. Скажем так: «Электроны всегда поступают одинаковыми порциями».

Точно так же, как в опыте с пулями, мы можем теперь приступить к поиску ответа на вопрос: «Какова относительная вероятность того, что электронная «порция» поступит в поглотитель на различных расстояниях x от середины?» Как и раньше, мы получим относительную вероятность, подсчитывая частоту щелчков при стабильно работающей электронной пушке. Вероятность того, что порции окажутся на определенном расстоянии x , пропорциональна средней частоте щелчков в этом x .

Результат нашего эксперимента — интересная кривая P_{12} , изображенная на рис. 6.3, в. Да! Именно так ведут себя электроны.

Интерференция электронных волн

Теперь давайте проанализируем кривую на рис. 6-3 и посмотрим, сможем ли мы объяснить поведение электронов. Во-первых, нужно сказать, что, поскольку они поступают порциями, то каждая порция, которую мы вполне можем называть просто «электрон», прошла либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2. Давайте запишем это в форме «Утверждения»:

Утверждение А: Каждый электрон проходит *либо* через отверстие 1, *либо* через отверстие 2.

Принимая утверждение А, все электроны, достигшие поглотителя, мы можем разделить на два класса: 1) проникшие через отверстие 1 и 2) проникшие через отверстие 2. Следовательно, полученная нами в ходе наблюдения кривая — это сумма эффектов от электронов, прошедших через отверстие 1, и электронов, прошедших через отверстие 2. Давайте проверим эту гипотезу экспериментально. Сначала произведем измерения с электронами, прошедшими через отверстие 1. Закроем отверстие 2 и подсчитаем количество щелчков на детекторе. На основании частоты щелчков получаем P_1 . Результат этого измерения показан на кривой P_1 (рис. 6.3, б). В этом результате, как кажется, нет ничего неожиданного. Таким же образом мы измеряем P_2 — распределение вероятностей для электронов, прошедших через отверстие 2. Результат этого измерения также показан на рисунке.

Результат P_{12} , полученный, когда оба отверстия открыты, явно не является просто суммой P_1 и P_2 (суммой вероятностей для каждого из отверстий по отдельности). По аналогии с нашим экспериментом с волнами на воде, мы говорим: «Имеет место интерференция».

$$\text{Для электронов: } P_{12} \neq P_1 + P_2. \quad (6.5)$$

Как может возникнуть подобная интерференция? Пожалуй, мы могли бы сказать: «Это, по-видимому, *неверно*, будто электронные «порции» проходят *либо* через отверстие 1, *либо* через отверстие 2, потому что в таком случае вероятности складывались бы. Возможно, они движутся более сложным образом. Разделяются пополам и...» Стоп! Это невозможно, они всегда поступают равными порциями... «Ладно, тогда, возможно, кое-кто из них пройдя через отверстие 1, заворачивает в отверстие 2, затем еще и еще раз, или движется еще по какой-нибудь сложной траектории... Тогда, закрывая отверстие 2, мыотрежем им путь и изменим вероятность того, что электрон, *отправившийся* от отверстия 1, в конце концов попадет в поглотитель». Но заметьте: есть некоторое точки на кривой, в которые попадает очень мало электронов даже тогда, когда *оба* отверстия открыты, но которые получают много электронов, если мы закроем одно отверстие, так что получается, что, *закрывая* одно из них, мы *увели-*

чиваем число электронов, проходящих через другое. Заметьте также, что в центре графика P_{12} более чем в 2 раза превышает сумму $P_1 + P_2$. Получается, что, закрывая одно отверстие, мы уменьшаем количество электронов, проходящих через другое. Трудно объяснить оба эффекта предположением, что электроны движутся по сложным траекториям.

Все это весьма загадочно. И чем больше вы раздумываете над этим, тем более загадочным это кажется. Выдвигалось множество идей, объясняющих кривую P_{12} движением отдельных электронов через оба отверстия по сложным траекториям. Ни одно из этих предположений не оправдалось. Ни одно из них не смогло правильно выразить P_{12} через P_1 и P_2 .

Как ни удивительно, математически представить зависимость P_{12} от P_1 и P_2 очень просто. Ибо P_{12} в точности соответствует кривой I_{12} на рисунке 6.2, а последнюю получить очень просто. То, что приближается к поглотителю, можно описать при помощи двух комплексных чисел, $\hat{\phi}_1$ и $\hat{\phi}_2$ (они являются функциями от x). Квадрат абсолютной величины $\hat{\phi}_1$ дает эффект от одного открытого отверстия 1. То есть, $P_1 = |\hat{\phi}_1|^2$. Эффект, полученный при одном открытом отверстии 2 выражается $\hat{\phi}_2$ точно таким же образом. То есть, $P_2 = |\hat{\phi}_2|^2$. Общее действие обоих отверстий выразится просто $P_{12} = |\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2|^2$. Математика точно совпадает с тем, что мы имели в случаях волн на воде! (Трудно показать, как можно прийти к такому простому результату, предполагая сложную игру электронов, снующих туда-сюда через пластину по некой сложной траектории.)

Мы можем сделать следующий вывод: электроны поступают порциями, подобно частицам, а вероятность поступления этих порций распределяется аналогично распределению интенсивности волн. Именно в этом смысле говорится, что электрон ведет себя «иногда как частица, а иногда как волна».

Между прочим, когда мы имели дело с классическими волнами, мы определяли интенсивность как среднее по времени от квадрата амплитуды волны, и использовали комплексные числа как математический прием, чтобы упростить расчет. Но в квантовой механике оказывается, что амплитуды должны представляться комплексными числами. Одной только действительной части недостаточно. Это так, техническое замечание, потому что формулы выглядят уж слишком похожими.

Поскольку вероятность прохода электронов через оба отверстия выражается так просто — хотя она и не равна $P_1 + P_2$, — то больше нам нечего сказать. Но есть очень много тонкостей, связанных с поведением природы. Мы хотели бы проиллюстрировать здесь некоторые из этих тонкостей. Во-первых, поскольку количество электронов, попадающих в определенную точку, не равно количеству прохождений через отверстие 1 плюс количество прохождений через отверстие 2 (как мы могли бы заключить из утверждения А), то мы, несомненно, могли бы сделать вывод о том, что *утверждение А неверно*. Неверно, что электрон проходит *либо* через отверстие 1, *либо* через 2. Но этот вывод может быть проверен другим экспериментом.

Наблюдение за электронами

Теперь давайте попробуем провести такой эксперимент. К нашему электронному прибору добавим очень сильный источник света, размещенный за стенкой между двумя отверстиями, как показано на рис. 6.4. Мы знаем, что электрические заряды рассеивают свет. Поэтому электрон, по какой бы траектории он ни следовал на своем пути к детектору, обязательно рассеет немного света в наш глаз, так что мы будем *видеть*, где прошел электрон. Если, например, он должен был бы пройти по траектории через отверстие 2, показанной на рис. 6.4 пунктирной ли-

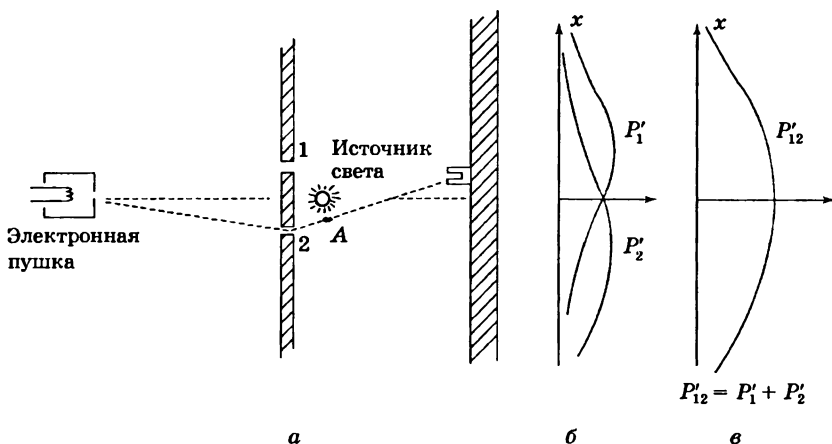


Рис. 6.4. Другой эксперимент с электронами

нией, то мы увидели бы вспышку света недалеко от места, обозначенного А. Если бы электрон проходил через верхнее отверстие, то мы бы увидели вспышку в районе отверстия 1. Если бы мы вдруг увидели вспышки света одновременно в двух местах, вследствие того, что электрон разделился пополам, то... Впрочем, перейдем к эксперименту!

Вот что мы наблюдаем: *всякий раз*, когда мы слышим щелчок нашего электронного детектора (на задней стенке), мы *также видим* вспышку света *либо* возле отверстия 1, *либо* возле отверстия 2, но *никогда* у обоих вместе! Так происходит при любом положении детектора. Из этого наблюдения мы делаем вывод, что, когда мы смотрим на электрон, мы обнаруживаем, что он проходит *либо* через одно отверстие, *либо* через другое. Эксперимент полностью подтверждает утверждение А.

Тогда где мы ошиблись, придя к выводу, что утверждение А *неверно*? Почему P_{12} не равняется просто сумме P_1 и P_2 ? Опять беремся за эксперимент! Давайте проследим движение электронов и установим, что они делают. Для каждого положения детектора (для каждого фиксированного x) подсчитаем количество поступающих электронов и *одновременно* будем прослеживать, через какое отверстие они проходят, наблюдая за вспышками света. Можно отследить ситуацию таким образом: *всякий раз*, когда мы будем слышать «щелчок», будем ставить галочку в колонке 1, если вспышка была видна у отверстия 1, а если вспышка была видна у отверстия 2, то будем ставить галочку в колонке 2. Каждый поступающий в детектор электрон будет записан в одном из двух классов: прошедших через отверстие 1 или прошедших через отверстие 2. Из числа галочек в столбике 1 мы получаем вероятность P'_1 того, что электрон прошел через отверстие 1, а из числа записей в столбике 2 получаем вероятность P'_2 того, что электрон поступил на детектор через отверстие 2. Если мы теперь повторим наши измерения для многих различных значений x , то получим кривые P'_1 и P'_2 , показанные на рисунке 6.4.

Ну что ж, это не слишком удивительно! Мы получили для P'_1 нечто очень подобное тому, что получали раньше для P_1 , закрывая отверстие 2; а P'_2 очень похоже на то, что мы получили, закрывая отверстие 1. Так что здесь *нет* никаких хитростей, вроде прохождения электрона через оба отверстия. Когда мы наблюдаем за электронами, то оказывается, что они проходят

через одно из отверстий точно так, как мы ожидали. Закрыты ли отверстия или открыты, те электроны, которые мы видим проходящими через отверстие 1, распределяются одинаково.

Но стоп! Какова же *теперь* полная вероятность — вероятность того, что электрон попал в детектор по любому из маршрутов? Но мы это уже знаем. Мы просто делали вид, что никогда не смотрели на световые вспышки, считая электроны, и теперь мы сложим в одну кучу щелчки детектора, разделенные у нас на два столбца. Мы *должны* просто *сложить* числа! Чтобы получить вероятность того, что электрон попадет в детектор через *любое* отверстие, мы находим $P'_{12} = P_1 + P_2$. То есть, в то время как нам удалось проследить, через какое отверстие проходят наши электроны, мы уже не получаем прежнюю кривую интерференции P_{12} , но вместо нее имеем новую, P'_{12} , без интерференции! Если мы выключим свет, то вновь получим кривую P_{12} .

Мы должны сделать вывод, что *когда мы наблюдаем за электронами*, их распределение на экране иное, чем когда мы не наблюдаем. Может быть, это включение света что-то нарушило? Должно быть, электроны очень чувствительны, и свет, когда он рассеивается электронами, дает им толчок и меняет их движение? Мы знаем, что электрическое поле света, действующее на заряд, прилагает к нему силу. Так что, возможно, нам *следует* ожидать изменения траектории электронов. В любом случае, свет оказывает значительное влияние на электроны. Пытаясь «проследживать» поведение электронов, мы изменили их движение. То есть, толчок, сообщаемый электрону при рассеивании фотонов, достаточен для того, чтобы изменить движение электрона настолько, что он, вместо того, чтобы попасть в максимум P_{12} , попадает в минимум P_{12} ; вот почему мы не наблюдаем больше эффекта интерференции.

Вы можете подумать: «Не надо использовать настолько яркий источник света! Уменьшите яркость! Тогда световые волны будут слабее и не будут настолько сильно возмущать электроны. Ясно, что, уменьшая постепенно силу света, можно добиться того, что воздействие света на электрон будет пренебрежимо мало и им можно будет вообще пренебречь». Хорошо, давайте попробуем. Первое, что мы видим, — что вспышки света, рассеянного на электронах, *не* становятся слабее. *Эти вспышки всегда одной и той же силы*. Единственное изменение, которое наблюдается с уменьшением силы света, — что иногда мы слышим щел-

чок детектора, но не видим вообще никакой вспышки. Электрон прошел «незамеченным». Мы просто видим, что свет ведет себя *так же* как электроны: мы *знали*, что он ведет себя как волна, но теперь мы и в нем обнаруживаем «порции». Свет всегда поступает — или рассеивается — порциями, которые мы называем «фотонами». Понижая *интенсивность* светового источника, мы не меняем *величины* фотонов, а только *скорость*, с которой они излучаются. Именно *этим* объясняется, почему некоторые электроны проходят незамеченными, когда мы уменьшаем силу света: просто при прохождении электрона рядом не оказалось ни одного фотона.

Все это немного обескураживает. Если верно, что всякий раз, когда мы «видим» электрон, мы видим одинаковые вспышки, то те электроны, которые нам удастся заметить, — это были возмущенные электроны. Все же давайте проведем эксперимент с тусклым светом. Теперь всякий раз, когда мы будем слышать щелчок детектора, мы будем делать запись в одном из трех столбцов: в столбце (1) — если электрон прошел через отверстие 1; в столбце (2), если электрон прошел через отверстие 2; и в столбце (3), если электрон вообще не был замечен. После обработки полученных данных (вычисления вероятностей), у нас будут следующие результаты: электроны, замеченные у отверстия 1, имеют распределение, аналогичное P'_1 ; замеченные у отверстия 2 — распределение, аналогичное P'_2 (так что «замеченные у одного из двух отверстий» имеют распределение вероятности, аналогичное P'_{12}); те же электроны, которые вообще не были замечены, имеют «волноподобное» распределение, точно соответствующее P_{12} на рисунке 6.3! *Если электрон не был замечен, то наблюдается интерференция!*

Это уже можно понять. Если мы не видим электрон, значит ни один фотон не возмутил его, а если мы замечаем его, значит, он возмущен фотоном. Степень возмущения всегда одна и та же, потому что фотоны света производят вспышки всегда одной и той же силы, достаточной, чтобы смазать эффект интерференции.

Нет ли хоть *какого-то* способа увидеть электрон, не возмущая его? В одной из предыдущих глав мы установили, что импульс, уносимый фотоном, обратно пропорционален его длине волны ($p = h/\lambda$). Чем больше импульс у фотона, тем сильнее он толкает электрон, когда рассеивается на нем. Вот! Если мы хотим меньше возмущать электроны при наблюдении, то не стоит

снижать *интенсивность* света, лучше снизить его *частоту* (или увеличить длину волны, что то же самое). Давайте попробуем использовать красный свет. Мы могли бы даже использовать инфракрасный свет или радиоволны (например, радар), и «увидеть», где проходит электрон, при помощи соответствующего оборудования, приспособленного для восприятия длинноволнового света. Если мы будем использовать более «мягкий» свет, возможно, нам удастся избежать сильного возмущения электронов.

Итак, проведем эксперимент с более длинными волнами. Будем повторять его раз за разом, все время увеличивая длину волны. Поначалу, по всей видимости, ничего не изменится. Результаты те же самые. Затем происходит ужасная вещь. Помните, когда мы изучали микроскоп, то заметили, что в силу *волновой природы* света есть нижний предел расстояния, на котором могут находиться две точки и при этом быть различимы. Это расстояние порядка длины волны света. Поэтому теперь, когда длина волны сравнялась с промежутком между отверстиями, мы видим *большую* размытую вспышку. Мы больше не можем сказать, через какое отверстие прошел электрон! Мы знаем только то, что *где-то* он проскочил! И именно начиная с этой длины волны мы обнаруживаем, что толчки становятся еле заметными, а кривая P'_{12} начинает походить на P_{12} — то есть начинает чувствоваться интерференция. И лишь для длин волн, существенно превышающих расстояние между двумя отверстиями (когда у нас вообще нет никакой возможности сказать, где прошел электрон), возмущение, причиняемое светом, становится настолько незначительным, что мы снова получаем кривую P_{12} , изображенную на рис. 6.3.

В этом эксперименте мы установили, что невозможно подобрать такую длину волны, чтобы знать, через какое отверстие прошел электрон, и в то же время не нарушить интерференцию. Гейзенберг предположил, что вновь открытый закон природы может быть непротиворечивым только в том случае, если возможности нашего опытного познания мира скованы некими фундаментальными ограничениями, прежде не выявленными. Он предложил в качестве общего принципа свой *принцип неопределенности*, который мы можем сформулировать в терминах нашего эксперимента следующим образом: «Невозможно построить такой аппарат, чтобы определить, через какое отверстие проходит электрон, не возмущая электрон до такой степе-

ни, что интерференционная картина пропадает». Если аппарат дает возможность определить, через какое отверстие проходит электрон, он *не может* быть достаточно чувствительным, чтобы не нарушить существенным образом интерференционную картину. Никто до сих пор не обнаружил (и даже не помыслил) способа обойти принцип неопределенности. Так что нам приходится допустить, что этот принцип описывает одну из основных характеристик природы.

Полная теория квантовой механики, которую мы сегодня используем для описания атомов и, на самом деле, всего вещества, зависит от правильности принципа неопределенности. Квантовая механика до сих пор была успешна, это укрепляет нашу уверенность в принципе неопределенности. Но если когда-либо обнаружится способ «побить» принцип неопределенности, то квантовая механика начнет давать противоречивые результаты, и ее придется отвергнуть, как неадекватно описывающую действительность.

Вы скажете: «Хорошо, а что же с утверждением А? Истинно или *не* истинно, что электрон проходит либо через отверстие 1, либо через отверстие 2?» Единственный ответ заключается в том, что существует некоторый определенный способ, которым мы должны мыслить, чтобы не прийти к противоречию. Чтобы не делать ошибочных предсказаний, мы должны сказать следующее: если некто наблюдает за отверстиями, или, точнее, если имеется прибор, способный определять, через какое именно отверстие проходит электрон, тогда *можно* сказать, что он прошел через отверстие 1 (или 2). Но если мы *не* пытаемся определить, по какому пути движется электрон, тогда мы *не* можем сказать, что электрон проходит либо через отверстие 1, либо через отверстие 2. Если мы все же будем утверждать это, и станем делать выводы из этого утверждения, то получим ошибки в анализе. Это та струна, по которой мы должны идти, подобно канатоходцу, если хотим добиться успеха в описании природы.

* * *

Если движение всего вещества — точно так же, как электронов — нужно описывать, пользуясь волновыми понятиями, то как же тогда быть с нашим первым экспериментом с пулями? Почему там мы не наблюдали эффекта интерференции? Оказывается, что у пуль «длина волны» настолько мала, что интерференционные полосы становятся очень тонкими — настолько, что любой детектор разумных размеров не поможет нам разли-

чить максимумы и минимумы кривой. Мы наблюдали лишь усредненные значения, укладываемые в классическую кривую. На рис. 6.5 мы попытались показать схематически, что происходит с крупными телами. На рис. 6.5, а показано распределение вероятностей для пуля, предсказанное квантовой механикой. Стремительные взлеты и падения кривой должны представлять интерференционную картину от очень коротких волн. Любой физический детектор, однако, покрывает несколько колебаний этой кривой, поэтому измерения дадут гладкую кривую, показанную на рис. 6.5, б.

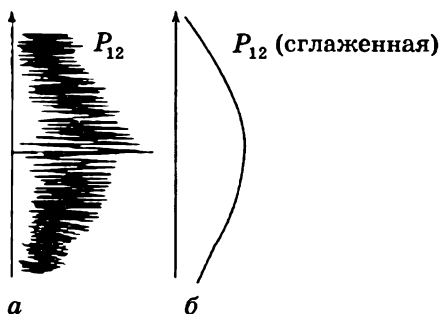


Рис. 6.5. Интерференционная картина в случае с пулями: а — действительная (схематически); б — наблюдаемая

Исходные принципы квантовой механики

Теперь сформулируем в сжатой форме главные следствия, вытекающие из наших экспериментов. Однако мы изложим эти результаты в такой форме, чтобы они имели силу для всего класса аналогичных экспериментов. Мы можем упростить эту задачу, если вначале зададим определение «идеального эксперимента», т. е. эксперимента, в котором отсутствуют неопределенные внешние воздействия, например, колебания и другие процессы, которые мы не можем с точностью учесть. Точная формулировка такова: «Идеальным называется такой эксперимент, в котором все начальные и конечные условия полностью определены». То, что мы называем «событием», — это, как правило, не что иное как особый набор начальных и конечных условий. (Например: «электрон вылетает из пушки, попадает в детектор, и больше ничего не происходит».) Теперь о наших выводах.

Краткие выводы:

- (1) Вероятность некоего события в идеальном эксперименте равняется квадрату абсолютного значения комплексного числа φ , именуемого амплитудой вероятности.

$$\begin{aligned} P &= \text{вероятность,} \\ \varphi &= \text{амплитуда вероятности,} \\ P &= |\varphi|^2. \end{aligned} \quad (6.6)$$

- (2) Если событие в эксперименте может осуществляться несколькими взаимно исключающими способами, то амплитуда вероятности для события равняется сумме амплитуд вероятностей для каждого отдельного способа. При этом возникает место интерференция.

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2, \\ P &= |\varphi_1 + \varphi_2|^2. \end{aligned} \quad (6.7)$$

- (3) Если проводится эксперимент, дающий возможность определить, какой из этих взаимно исключающих способов осуществляется в действительности, то вероятность события равняется сумме вероятностей для каждого отдельного способа. Интерференция отсутствует.

$$P = P_1 + P_2. \quad (6.8)$$

Кто-то все еще захочет выяснить: «Ну как это происходит? Какой механизм стоит за всем этим?» Пока никто не обнаружил за этим законом никакого механизма. Никто не сможет «объяснить» больше, чем мы только что «объяснили». Никто не даст вам более глубокого представления о положении вещей. У нас нет никаких идей относительно более фундаментального механизма, из которого можно было бы вывести эти результаты.

Мы хотели бы подчеркнуть принципиальное различие между классической и квантовой механикой. Мы говорили о вероятности, с которой электрон будет зафиксирован в определенных условиях. При этом подразумевалось, что в условиях нашего эксперимента (и даже наилучшего из возможных) нельзя предсказать абсолютно точно, что произойдет. Мы способны только определять шансы! Если это верно, значит, физика отказывается от стремления к точным предсказаниям того, что произойдет при

определенных условиях. Да! Физика *уже* отказалась от этого стремления. Мы не умеем *предсказывать*, что произойдет при данных условиях. Мало того, мы уверены, что это невозможно — единственное, что можно предсказать, — это вероятность тех или иных событий. Нужно признать, что мы сильно изменили наши прежние идеалы понимания природы. Возможно, это шаг назад, но пока никто не нашел способа избежать его.

Еще несколько замечаний по поводу утверждения, которое иногда выдвигается теми, кто не хотел пользоваться приведенным описанием: «Возможно, внутри электрона скрывается некий механизм — некие внутренние переменные — о которых мы пока ничего не знаем. Возможно, именно поэтому мы не можем предсказать, что произойдет. Если бы мы могли попристальнее понаблюдать за электроном, то могли бы сказать, куда он в конце концов попадет». Насколько нам известно, это невозможно. У нас все же остались бы неразрешимые трудности. Допустим, что внутри электрона есть некоторый механизм, который определяет, куда он собирается попасть. Этот же механизм должен *также* определять, через какое отверстие электрон пройдет на своем пути. Но не нужно забывать, что этот внутренний механизм не должен зависеть от того, что мы делаем, и в частности от того, закрываем мы или открываем одно из отверстий. Так что даже если бы электрон, прежде чем отправляться в путь, уже заранее решил, в какое отверстие он направляется и где он собирается «приземлиться», мы бы определили вероятность P_1 для тех электронов, которые избрали отверстие 1, P_2 для тех, которые избрали отверстие 2, и с необходимостью — сумму $P_1 + P_2$ для тех, которые прошли через оба отверстия. Похоже, нет никакого способа избежать этого вывода. Но мы установили экспериментально, что это не так. И никто пока не нашел решения этой загадки. Так что в настоящее время мы должны удовлетвориться расчетом вероятностей. Мы говорим «в настоящее время», но очень сильно подозреваем, что останемся в таком положении навсегда — что невозможно разрешить эту загадку — что такова природа *на самом деле*.

Принцип неопределенности

Вот как Гейзенберг первоначально сформулировал свой принцип неопределенности: если вы изучаете какое-то тело, и при этом можете определить x -составляющую его импульса

с неопределенностью Δp , то вы не можете одновременно знать координату x его положения с точностью большей, чем $\Delta x = h/\Delta p$.

Произведение неопределенностей в положении тела и в его импульсе в каждый момент времени должно быть больше постоянной Планка. Это частный случай принципа неопределенности. Более общая формулировка была высказана ранее: нельзя никаким образом построить прибор, дающий возможность определить, какое именно из двух возможных событий осуществится, не нарушая при этом картину интерференции.

Покажем для одного частного случая, что отношение неопределенностей, заданное Гейзенбергом, должно быть истинным, чтобы не возникало противоречий. Представим себе такое видоизменение эксперимента с рисунка 6.3: теперь пластина с отверстиями будет крепиться на роликах, дающих возможность перемещать ее вверх и вниз (в x -направлении) (рис. 6.6). Наблюдая очень пристально за движением пластины, мы могли бы попытаться определить, через какое отверстие проходит электрон. Представим себе, что детектор установлен в точке $x = 0$. Мы можем ожидать, что электрон, проходящий через отверстие 1, должен отклониться пластиной вниз, чтобы попасть в детектор. Поскольку вертикальная составляющая импульса электрона изменилась, пластина должна получить отдачу с рав-

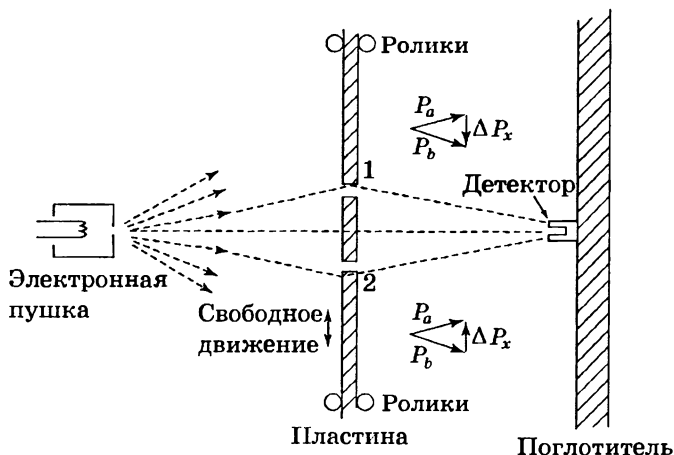


Рис. 6.6. Эксперимент, в котором измеряется отдача пластины

ным импульсом, но в противоположном направлении. Пластина получит толчок вверх. Если электрон проходит через нижнее отверстие, то пластина получает толчок вниз. Ясно, что для любого положения детектора импульс, получаемый пластиной, будет иметь различную величину при прохождении электрона через отверстие 1 и через отверстие 2. Ура! Совершенно не нарушая движение электронов, ничем не возмущая его, а просто наблюдая за *пластиной*, мы можем сказать, по какому пути пошел электрон.

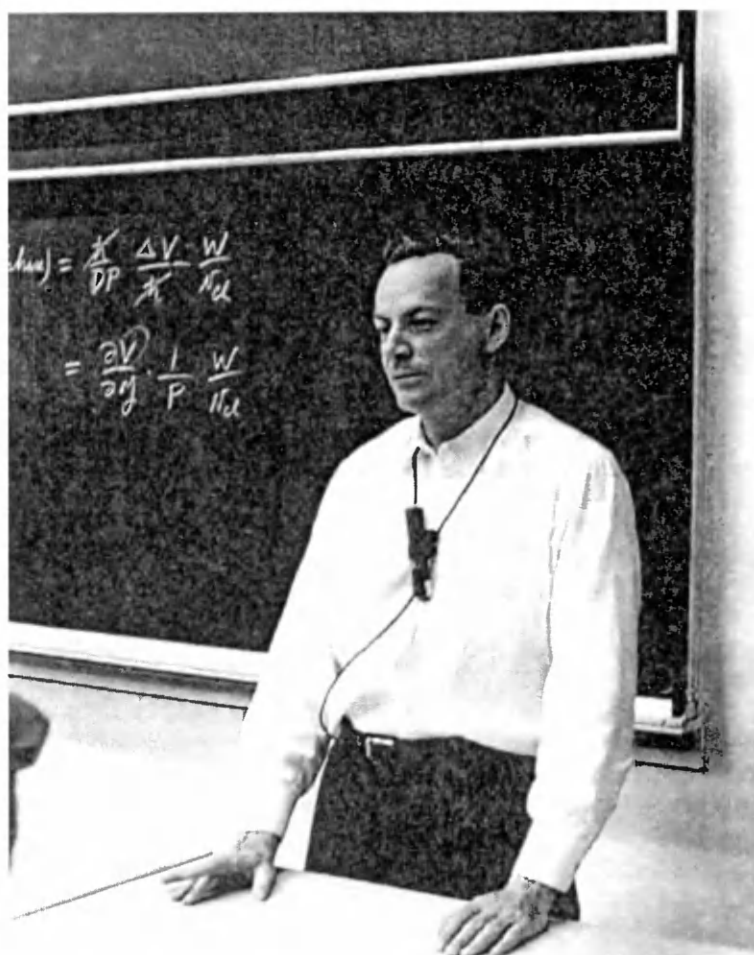
Теперь для этого необходимо определить, каков импульс пластины до прихода электрона. Тогда, измерив ее импульс после прохождения электрона, мы могли бы установить, насколько изменился импульс пластины. Но не забывайте, что, согласно принципу неопределенности, при этом невозможно будет знать положение пластины с произвольной точностью. Однако если мы не знаем точно, *где* находится пластина, то не сможем и точно сказать, где расположены наши отверстия. Они будут находиться в новом месте для каждого проходящего через них электрона. Это значит, что центр интерференционной картины будет на новом месте для каждого из электронов. Интерференционные полосы (колебания вероятности) будут смазаны. В следующей главе мы докажем математически, что при измерении импульса пластины (с точностью, достаточной, чтобы определить по импульсу отдачи, через какое отверстие прошел электрон) неопределенности x -положения пластины будет достаточно, чтобы наблюдаемая на детекторе картина сдвигалась вверх и вниз примерно на расстояние от максимума до ближайшего к нему минимума. Такое случайное отклонение как раз достаточно для того, чтобы полностью смазать интерференционную картину, и никакой интерференции наблюдаться не будет.

Принцип неопределенности «защищает» квантовую механику. Гейзенберг признавал, что если бы было возможно измерить импульс и положение электрона одновременно с большей точностью, то квантовая механика потерпела бы крах. Поэтому он предполагал, что это невозможно. Тогда ученые стали искать способы обойти этот принцип. Но пока никому не удалось измерить положение и импульс чего бы то ни было — будь то экран, электрон, бильярдный шар, все равно — со сколько-нибудь большей точностью. Квантовая механика продолжает жить своей рискованной, но четко очерченной жизнью.

II

Шесть

не столь простых
фрагментов



От издателя*

После громкого успеха и популярности «Шести простых фрагментов» (Эддисон-Уэсли, 1995) у читающей публики, студентов, равно как и у профессиональных ученых возник интерес к другим работам Фейнмана. Поэтому мы обратились к первоначальным «Лекциям по физике» и к архивам КАЛТЕХа в поисках еще какого-нибудь «легкого» материала. Его не оказалось. Но обнаружили «не столь легкие» лекции, которые, хотя и содержат некоторый математический аппарат, не слишком трудны для начинающих студентов; к тому же и для студентов и менее подготовленных читателей эти лекции столь же интересны и захватывающи, как и первые шесть.

Другое отличие этих «не столь простых фрагментов» от первых шести состоит в том, что первые шесть охватывали несколько разделов физики — от механики до термодинамики и атомной физики. А новые шесть фокусируются на предмете, связанном с самыми революционными открытиями и с самыми ошеломляющими теориями современной физики: от черных дыр до «червячных» дыр, от атомной энергии до искажений времени; конечно же, мы говорим об Относительности. Но даже сам великий Эйнштейн, отец Относительности, не мог объяснить действие своей теории, ее фундаментальные концепции и парадоксы так, как это смог сделать этот парень из Нью-Йорка, Ричард Ф. Фейнман, в чем вы сможете убедиться, прочтя эту книгу.

Издательство Эддисон Уэсли Лонгман благодарит Роджера Пенроуза за проникновенное предисловие к этому изданию; Брайана Хатфилда и Дэвида Пайнса за бесценные советы при отборе шести лекций; а также физический факультет Калифорнийского технологического института и институтский архив, в особенности Джудит Гудстейн, за помощь в подготовке этого издания.

* На языке оригинала книга была опубликована издательством Addison-Wesley. — *Прим. перев.*

Введение

Чтобы понять, почему Ричард Фейнман был великим учителем, важно оценить его роль как ученого. Он был бесспорно одной из выдающихся фигур в теоретической физике двадцатого века. Его вклад в эту дисциплину является центральным в развитии того направления, в котором квантовая теория используется в новейших исследованиях, и, следовательно, в создании современной картины мира. Интегралы Фейнмана, диаграммы Фейнмана, правила Фейнмана принадлежат к основным инструментам современного физика-теоретика — инструментам, необходимым для применения принципов квантовой теории к физическим полям (т. е. для квантовой теории электронов, протонов и фотонов), и образующим существенную часть процедур, с помощью которых эти принципы приводятся в соответствие с требованиями специальной теории относительности Эйнштейна. Хотя ни одна из этих идей не является легкой для понимания, особый фейнмановский подход всегда отличался глубокой ясностью, отмечая ненужные усложнения в том, что им предшествовало. Существовала тесная связь между его способностью проводить исследования и его качествами преподавателя. Он обладал редким талантом пробиваться сквозь сложности, которые часто затуманивают сущность физической проблемы, и ясно видеть лежащие в ее основе физические принципы.

Однако, согласно общераспространенному мнению, Фейнман больше известен своими выходками, шутовством и буффонадой, непочтительным отношением к авторитетам, игрой на барабане бонго, связями с женщинами, посещением клубов со стриптизом, попытками попасть в загадочную страну Туву в центральной Азии и многим другим. Бесспорно, он был чрезвычайно умен, что ясно демонстрируют его молниеносная ско-

рость вычислений, его подвиги, включающие вскрытие сейфа, одурачивание службы безопасности, расшифровка древних текстов майя, не говоря уже о Нобелевской премии. Но ничто из перечисленного не дает представления о том положении, которое он несомненно занимал среди физиков и других ученых, как один из глубочайших и оригинальнейших умов двадцатого века.

Выдающийся физик и писатель Фримен Дайсон, сотрудничавший с Фейнманом в ранние годы, когда тот развивал свои наиболее важные идеи, написал в письме своим родителям в Англию весной 1948 года: «Фейнман — это молодой американский профессор, наполовину гений, наполовину клоун, который постоянно забавляет всех физиков и их детей своей кипучей энергией. Однако, как я недавно понял, в нем заключено гораздо большее, чем это...» Позднее, в 1988 году, он напишет: «Более правильно было бы сказать, что Фейнман был целиком гений и целиком клоун. Глубокое мышление и веселая клоунада не были отдельными частями его раздвоенной личности. Он думал и дурачился одновременно*». Действительно, во время лекций его остроумие было непосредственным и зачастую скандальным. Своими шутками он держал внимание аудитории, но никогда не позволял им отвлекать слушателей от цели лекции — добиться истинного и глубокого понимания. Смех позволяет слушателям чувствовать себя непринужденно, а не быть обескураженными под влиянием пугающих математических выражений и физических концепций, воспринимаемых с мучительными усилиями. И все же, хотя он любил быть в центре внимания и, без сомнения, был шоуменом, не это было целью его выступлений. Целью было передать понимание основополагающих физических идей и существенного математического аппарата, необходимого для правильного выражения этих идей.

Хотя смех и играл ключевую роль в удержании внимания аудитории, важнее для достижения понимания была непосредственность Фейнмана. Он выражал свои мысли прямо, без околичностей, и презирал пустое философствование при незначительном физическом содержании. Примерно таким же было его отношение к математикам. Он редко использовал пунктуальные

* Цитаты из Дайсона можно найти в его книге «From Eros to Gaia» (Pantheon Books, New York, 1992) на стр. 325 и 314 соответственно.

математические тонкости, но мастерски владел необходимым ему математическим аппаратом, достигая при этом ясности и выразительности. Он не чувствовал себя никому обязанным и никогда не принимал на веру высказывания других, не выработав собственного мнения. Поэтому его подход как к исследованиям, так и к преподаванию был поразительно оригинальным. И когда Фейнман шел совершенно другим путем, чем его предшественники, можно было с уверенностью сказать, что именно фейнмановский подход окажется более плодотворным.

Фейнман предпочитал устный способ общения. Он не часто и не легко использовал печатное слово. Конечно же, в научных статьях просматривался определенный «фейнмановский» стиль, но в несколько приглушенной форме, а полностью его таланты раскрывались в лекциях. Чрезвычайно популярные «Фейнмановские лекции» представляют собой по сути отредактированную расшифровку (сделанную Робертом Лейтоном и Мэттью Сандсом) лекций, которые читал Фейнман, и захватывающий характер текста ощущается всеми, кто этот текст читал. Представленные здесь «Шесть не столь простых фрагментов» взяты из тех записей. Однако даже здесь печатное слово упускает нечто весьма существенное. Чтобы почувствовать то волнение, которое вызывали лекции Фейнмана, важно, как мне кажется, слышать его голос. Тогда мы начинаем целиком разделять прямоу Фейнмана, его непочтительность и его юмор. К счастью, существует звукозапись всех лекций, представленных в этой книге, и я настоятельно рекомендую, если есть такая возможность, сначала прослушать хотя бы часть этих записей. Услышав однажды его убедительный, очаровывающий голос, остроумные комментарии, произносимые с нью-йоркскими интонациями, мы не забудем, как он звучит, и это создаст у нас образ, который будет с нами во время чтения. И независимо от того, прочтем эти главы или нет, мы сможем разделить то очевидное глубокое волнение, которое он испытывал, исследуя необычайные законы, управляющие движением Вселенной.

Данная серия из шести лекций была тщательно подобрана таким образом, чтобы соответствовать несколько более высокому уровню, чем шестерка из предыдущего набора, озаглавленного «Шесть простых фрагментов» (опубликованная издательством Эддисон Уэсли Лонгман в 1995 году). Более того, они хорошо согласуются между собой и составляют великолепный отчет об одной из важнейших областей современной теоретической физики.

Эта область — *относительность*, которая ворвалась в сознание людей в начале этого века, и у большинства связана прежде всего с именем Эйнштейна. Действительно, это Альберт Эйнштейн в 1905 году впервые четко сформулировал глубокие принципы, лежащие в основе этой новой сферы деятельности физиков. Но перед ним были и другие, в особенности Генрих Антон Лоренц и Анри Пуанкаре, которые уже поняли основы этой новой для того времени физики. Более того, великие ученые Галилео Галилей и Исаак Ньютон за столетия до Эйнштейна уже указывали, что в динамических теориях, которые они сами развивали, физика, воспринимаемая равномерно движущимся наблюдателем, идентична физике, воспринимаемой неподвижным наблюдателем. Ключевая проблема в этом вопросе возникла позднее, вместе с опубликованием в 1865 году открытых Джеймсом Клерком Максвеллом уравнений, которые описывают поведение электрического и магнитного полей и которые также управляют распространением света. Казалось бы, отсюда следует, что принцип относительности Галилея и Ньютона уже не справедлив, поскольку согласно уравнениям Максвелла свет должен иметь определенную скорость распространения. Соответственно, покоящийся наблюдатель должен отличаться от движущегося, ибо только для покоящегося наблюдателя свет распространяется во всех направлениях с одинаковой скоростью. Принцип относительности Лоренца, Пуанкаре и Эйнштейна отличается от соответствующего принципа Галилея и Ньютона, но он подразумевает то же самое: физика, воспринимаемая равномерно движущимся наблюдателем, на самом деле идентична той, что воспринимает неподвижный наблюдатель.

Однако в новой относительности уравнения Максвелла совместимы с этим принципом, и скорость света имеет одинаковое значение во всех направлениях, независимо от того, в каком направлении и с какой скоростью движется наблюдатель. Каким чудом удалось примирить эти очевидно несовместимые требования? Объяснение этого я предоставляю Фейнману с его неподражаемой манерой.

Относительность является, пожалуй, первой областью, где начала чувствоваться физическая мощь математической идеи *симметрии*. Идея симметрии известна многим, менее известно, как применить идею в соответствии с набором математических выражений. Но именно это требуется, чтобы реализовать принципы специальной относительности в системе уравнений. Что-

бы соблюдался принцип относительности, когда физика «выглядит одинаково» для равномерно движущегося и для неподвижного наблюдателей, должно существовать «преобразование симметрии», которое переводит величины, измеренные одним наблюдателем, в соответствующие величины другого. Это симметрия, поскольку физические законы являются теми же самыми для каждого наблюдателя, а «симметрия» утверждает, что нечто, рассматриваемое с различных точек зрения, является одним и тем же. Подход Фейнмана к абстрактным вещам такой природы является очень приземленным, и он способен излагать эти идеи таким образом, что они становятся доступными для людей, не имеющих специальных математических навыков или привычки к абстрактному мышлению.

Несмотря на то, что относительность указала путь к новым симметриям, которые не были восприняты ранее, некоторые из современных физических исследований показали, что определенные симметрии, считавшиеся прежде универсальными, на самом деле слегка нарушаются. Для физического сообщества стало потрясением, когда в 1957 году Ли, Янг и Ву показали, что в определенных базовых физических процессах законы, которым подчиняется некая физическая система, не совпадают с законами, которым подчиняется зеркальное отражение этой системы. Фейнман приложил руку к развитию физической теории, которая оказалась способной согласоваться с этой асимметрией. Его лекции показывают драматизм того, как последовательно раскрываются все более и более глубокие тайны природы.

По мере развития физики развивались формальные математические средства, необходимые для выражения новых физических законов. Когда математические инструменты искусно настроены для решения соответствующих задач, они могут значительно упростить восприятие физики. Примером этого может служить векторное исчисление. Векторное исчисление для трех измерений было разработано для нужд физики обычного пространства и обеспечило бесценный аппарат для выражения физических законов, таких как закон Ньютона, где в пространстве нет физически предпочтительных направлений. Другими словами, физические законы обладают симметрией относительно обычного вращения в пространстве. Фейнман использовал мощь векторных обозначений и лежащих в их основе идей для выражения этих законов.

Однако теория относительности говорит нам, что *время* также должно быть включено в рамки преобразований симметрии, поэтому требуется использовать *четырёхмерные* векторы. Соответствующее векторное исчисление вводится здесь Фейнманом, так как оно помогает понять, что не только время и пространство должны рассматриваться как различные аспекты одной и той же *четырёхмерной* структуры, но что в релятивистской схеме то же самое справедливо для энергии и импульса.

Идея, что историю Вселенной следует рассматривать, с физической точки зрения, как *четырёхмерное пространство-время*, а не как *трехмерное пространство*, меняющееся со временем, является по сути фундаментальной для современной физики. Значимость этой идеи осознать непросто. Сам Эйнштейн не испытывал симпатии к этой идее, когда впервые столкнулся с ней. На самом деле, идея пространства-времени не принадлежала Эйнштейну, хотя популярное мнение часто приписывает эту идею ему. Впервые идею *четырёхмерного пространства-времени* выдвинул русско-немецкий геометр Герман Минковский в 1908 году через несколько лет после того, как Пуанкаре и Эйнштейн сформулировали специальную теорию относительности. В одной из своих знаменитых лекций Минковский утверждал: «Впредь пространство само по себе и время само по себе обречены постепенно исчезнуть, превратиться в простые тени, и только некое их единство сохранит независимую реальность»^{*}.

Наиболее значительные научные открытия Фейнмана, на которые я ссылался выше, вытекали из его пространственно-временного подхода к квантовой механике. Нет никакого сомнения в важности пространства-времени для фейнмановских работ и для современной физики в целом. Поэтому неудивительно, что Фейнман убедителен в своем продвижении идей пространства-времени, делая упор на их физической значимости. Относительность — это не пустопорожние рассуждения, а пространство-время — это не простой математический формализм. Это фундаментальная составляющая той самой Вселенной, в которой мы живем.

Когда Эйнштейн освоился с идеей пространства-времени, он полностью включил ее в свой образ мышления. Она стала суще-

^{*} Цитата взята из Дуврского репринта важнейших публикаций об относительности «The Principle of Relativity». Авторы — Эйнштейн, Лоренц, Вейль и Минковский, Methuen and Co., 1923.

ственной частью его расширения специальной теории относительности — той теории относительности, на которую я ссылался выше, что ввели Лоренц, Пуанкаре и Эйнштейн, — к тому, что известно, как *общая* теория относительности. В общей теории относительности Эйнштейна пространство-время *искривляется*, и становится возможным встроить в это искривление феномен *гравитации*. Понятно, что эта мысль сложна для понимания, и в заключительной лекции Фейнмана из данного сборника он не делает попыток описать весь математический механизм, необходимый для полной формулировки теории Эйнштейна. Однако он дает описание, полное драматизма, с использованием интригующих аналогий, чтобы довести до слушателя существенные идеи.

Во всех своих лекциях Фейнман прилагал специальные усилия, чтобы сохранить точность своих описаний, в тех случаях, когда возникала опасность, что его упрощения или аналогии могут быть либо неверно истолкованы, либо привести к ошибочным выводам. Я чувствовал, однако, что его упрощенное изложение эйнштейновского уравнения поля в общей теории относительности нуждается в уточнении, которого он не сделал. Ибо в теории Эйнштейна «активная» масса, являющаяся источником энергии, не есть то же самое, что энергия (согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$); этим источником является плотность энергии плюс сумма давлений, и именно это — источник гравитационного ускорения, направленного внутрь. С этим дополнительным уточнением изложение Фейнмана — превосходно, оно представляет собой великолепное введение в эту самую красивую и независимую из физических теорий.

Хотя лекции Фейнмана совершенно явно нацелены на тех, кто испытывает сильное желание стать физиком — профессионально или по духу — они бесспорно доступны для тех, у кого подобное желание отсутствует. Фейнман был убежден (и я с ним согласен) в важности добиваться понимания нашей Вселенной — согласно усвоенным базовым принципам современной физики — в гораздо более широких масштабах, чем это может быть достигнуто простым обучением на курсах физики. Даже в поздние годы жизни, принимая участие в расследовании катастрофы с «Челленджером», он приложил большие усилия, чтобы показать по национальному телевидению, что причина аварии может быть понята на обычном уровне, и провел простой,

но убедительный эксперимент перед камерой, демонстрируя хрупкость колец уплотнителя челнока при низкой температуре.

Конечно же, он был шоуменом, иногда просто клоуном, но главная его цель всегда была серьезной. А какая цель может быть серьезней, чем понимание природы нашей Вселенной на ее самых глубинных уровнях? Ричард Фейнман лучше других мог передать это понимание.

Декабрь 1996

Роджер Пенроуз



1

Векторы

1.1. Симметрия в физике

В этой главе мы введем понятие, которое известно в физике как *симметрия законов физики*. Слово «симметрия» использовано здесь в необычном значении, и поэтому нуждается в определении. Как мы можем определить симметрию какого-либо предмета? Когда у нас есть симметричная картинка, то мы говорим, что одна ее сторона такая же, как другая. Профессор Герман Вейль дал такое определение симметрии: предмет симметричен, если его можно подвергнуть некоторой операции, после которой он окажется точно таким же, как вначале. Если мы повернем вазу на 180° вокруг вертикальной оси, и она будет выглядеть точно так же, то мы говорим, что она симметрична. Мы придадим определению симметрии по Вейлю более общую форму и будем обсуждать симметрию законов физики.

Предположим, что мы построили сложную машину, с множеством запутанных зацеплений, с какими-то шатунами, маховиками и так далее. Теперь предположим, что мы построили в другом месте точно такую же машину, состоящую из таких же частей с теми же размерами и с такой же ориентацией — все то же самое, только перенесенное на некоторое расстояние. Тогда, если мы запустим обе машины при строго одинаковых условиях, то возникает вопрос: будет ли одна машина вести себя точно так же как другая? Ответом вполне может быть *нет*, ибо если мы выбрали неудачное место для второй машины, скажем, она может оказаться около стены, взаимодействие с которой может помешать работе машины.

Все физические идеи требуют здравого смысла при их применении; ведь они не являются чисто математическими или абстрактными идеями. Нужно понимать, что мы имеем в виду, ког-

да говорим, что при переносе аппарата в новое положение наблюдается то же самое явление. Мы имеем в виду, что перенесим все, что можно перенести. Если же явление изменяется, мы предполагаем, что нечто, имеющее значение, не было перенесено, и продолжаем искать это. Если мы его не находим, то заявляем, что законы физики не обладают ожидаемой симметрией. Но если законы физики обладают этой симметрией, то мы можем найти помеху — и рассчитываем ее найти. Оглядываясь вокруг, мы можем, например, обнаружить, что стена мешает работе нашего аппарата. Основной вопрос состоит в следующем: если мы достаточно хорошо все изучили, если все основные источники силы включены в состав аппарата, если все имеющие значение части перенесены с одного места на другое, будут ли законы меняться? Будет ли этот механизм работать точно так же на новом месте?

То, что мы хотим сделать, — это перенести все оборудование и *источники основных влияний*, а отнюдь не *всё* на свете — планеты, звезды и все прочее, поскольку если мы это сделаем, то получим снова то же самое явление по той простой причине, что оказались бы там же, откуда начали. Нет, мы не можем перенести *всё*. Но на практике оказывается, что если передвигать устройство разумно, то механизм будет работать. Другими словами, если не заходить за стену, если знать источники внешних сил и устроить так, чтобы они тоже были перенесены, тогда механизм *будет* работать точно так же в новом месте, как и в прежнем.

1.2. Переносы начала координат

Ограничим наш анализ законами механики, которую мы теперь знаем достаточно. В предыдущих главах мы видели, что законы механики можно свести к системе трех уравнений, справедливых для любой частицы:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x, \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y, \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z. \quad (1.1)$$

Это означает, что существует такой способ измерить x , y и z вдоль трех перпендикулярных осей и силы вдоль этих направлений, что эти законы верны. Расстояния должны отсчитываться от некоторой начальной точки, но *где мы должны расположить эту точку?* Все, что сказал бы нам Ньютон, это то, что

существует такое место, откуда мы можем начать отсчет (возможно, центр Вселенной), и при измерении расстояний от него эти законы справедливы. Но мы можем немедленно показать, что никогда не найдем этот центр, ибо если используем какую-нибудь другую точку, то не заметим разницы. Другими словами, предположим, что имеются два человека — Джо, с начальной точкой в одном месте, и Мо, у которого система координат параллельна первой, но с начальной точкой в другом месте (рис. 1.1). Когда Джо определяет положение точки в пространстве, он получает x , y и z (обычно мы опускаем z , потому что изображать эту координату на рисунке слишком хлопотно). С другой стороны, Мо получит другое значение x (чтобы их различать, будем называть его x') и, в принципе, другое значение y , хотя в нашем примере они численно равны. Мы имеем

$$x' = x - a, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (1.2)$$

Теперь для завершения анализа мы должны знать, какие силы измеряет Мо. Предполагается, что сила действует вдоль некоторой прямой, и под силой вдоль направления x мы понимаем часть общей силы, равную приращению величины силы на косинус угла между направлением силы и осью x . Теперь мы видим, что Мо может использовать те же проекции силы, что и Джо, так что мы получим систему уравнений

$$F_{x'} = F_x, \quad F_{y'} = F_y, \quad F_{z'} = F_z. \quad (1.3)$$

Таково количественное соотношение между величинами, как их видят Джо и Мо.

Вопрос состоит в следующем: если Джо знает законы Ньютона, то будут ли они справедливы, когда их будет использовать

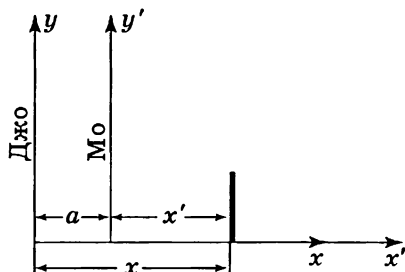


Рис 1.1. Две параллельные координатные системы

Мо? Имеет ли значение выбор начала координат? Другими словами, предположим, что уравнения (1.1) верны, и что уравнения (1.2) и (1.3) определяют соотношение между измерениями. Верно или нет, что

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad m \frac{d^2 x'}{dt^2} &= F_{x'}, \\ \text{(б)} \quad m \frac{d^2 y'}{dt^2} &= F_{y'}, \\ \text{(в)} \quad m \frac{d^2 z'}{dt^2} &= F_{z'}? \end{aligned} \tag{1.4}$$

Для проверки этих уравнений дважды продифференцируем выражение для x' по времени. Прежде всего

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{d}{dt}(x - a) = \frac{dx}{dt} - \frac{da}{dt}.$$

Теперь предположим, что начальная точка Мо зафиксирована (неподвижна) относительно Джо; поэтому a — постоянная и $da/dt = 0$, так что

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt}$$

и отсюда

$$\frac{d^2 x'}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2},$$

вследствие чего часть (а) системы уравнений (1.4) превратится в уравнение

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{x'}.$$

(Мы предполагаем также, что массы, измеренные Джо и Мо, равны.) Таким образом, произведение массы на ускорение у обоих получилось одинаковым. Мы получим также выражение для $F_{x'}$, сделав подстановку из уравнения (1.1). В результате, найдем, что

$$F_{x'} = F_x.$$

Следовательно, законы с точки зрения Мо кажутся теми же самыми; он тоже может записать, с другими координатами, законы Ньютона, и они по-прежнему будут верны. Это означает, что не существует центра Вселенной, потому что законы будут теми же самыми, из какого бы положения мы ни вели наблюдения.

Верно также следующее: если мы имеем в одном месте некоторое оборудование, то такое же оборудование в другом месте будет работать таким же образом. Почему? Потому что одна машина, изучаемая Мо, подчиняется тем же уравнениям, как и другая, изучаемая Джо. Поскольку *уравнения* одинаковы, одинаковыми будут и *явления*. Так что доказательство, что аппарат в новом положении работает так же, как и в старом положении, равносильно доказательству того, что уравнения, будучи перемещены в пространстве, воспроизводят самих себя. Поэтому мы говорим, что *законы физики симметричны относительно перемещений в пространстве*, симметричны в том смысле, что законы не изменяются, когда мы совершаем перенос начала системы координат. Конечно же, это вполне очевидно интуитивно, но любопытно рассмотреть математическую сторону этого явления.

1.3. Вращения

Выше мы разобрали первую задачу из все более усложняющихся задач, касающихся симметрии физических законов. Следующая теорема утверждает, что *направление* осей координат не имеет значения. Другими словами, если мы построили некоторое оборудование и видим, как оно работает, и рядом строим такой же аппарат, но располагаем его под некоторым углом, будет ли он работать так же? Очевидно, что это не так в случае, например, дедушкиных стенных часов! Если маятник расположен вертикально, часы работают, но если положить часы набок, то маятник упадет на стенку корпуса, и всё! Значит, теорема не верна в случае часов с маятником, если только забыть о силе, которая заставляет его качаться. Если мы верим в симметрию физических законов относительно вращения, то должны сделать вывод: кроме механизма, что-то еще участвует в работе часов с маятником, что-то вне часов, и нам следует найти это. Мы можем также предсказать, что часы с маятником будут идти по-разному, если располагать их в разных местах по

отношению к этому таинственному источнику асимметрии (предположительно к Земле). Действительно, мы знаем, что часы с маятником на искусственном спутнике, например, вообще не будут ходить из-за отсутствия эффективной силы, а на Марсе они будут идти с другой скоростью. Маятниковые часы содержат помимо механизма внутри корпуса нечто, находящееся снаружи. Осознав это, мы понимаем, что должны повернуть и Землю вместе с нашим аппаратом. Особенно волноваться по этому поводу не стоит, это очень просто сделать — надо лишь подождать немного, Земля повернется, и часы снова станут тикать в новом положении так же, как делали это раньше. Пока мы поворачивались в пространстве, наши углы все время изменялись, но это изменение не особенно нас беспокоит, поскольку в новом положении мы, по всей видимости, находимся в тех же условиях, что и в старом. Здесь заключен источник ошибки, ибо верно, что в новом, повернутом, положении законы такие же, как и в старом, но *неверно*, что, *когда мы поворачиваем* нечто, оно следует тем же законам, как если бы мы его не поворачивали. Если мы выполняем наши эксперименты достаточно аккуратно, то мы можем установить, что Земля *поворачивается*, но ни один из опытов не скажет нам, что она уже *повернулась*. Другими словами, мы не можем определить ее ориентацию, но можем сказать, что она изменяется.

Обсудим теперь влияние ориентации системы координат на физические законы. Давайте посмотрим, пройдет ли у нас та же самая игра с Джо и Мо. На этот раз, чтобы избежать ненужных усложнений, будем предполагать, что Джо и Мо используют одно и то же начало отсчета (мы уже показали, что их системы координат можно переносить в другое место). Пусть оси системы координат Мо повернуты относительно осей Джо на угол θ . Обе системы координат показаны на рис. 1.2, где мы ограничились двумя измерениями. Рассмотрим произвольную точку P с координатами (x, y) в системе Джо и (x', y') в системе Мо. Как и раньше, выразим координаты x' и y' через x, y и θ . Сначала опустим перпендикуляры из точки P на все четыре оси и проведем прямую AB перпендикулярно PQ . Из рисунка видно, что x' можно представить в виде суммы двух отрезков вдоль оси x' , а y' — в виде разности двух отрезков вдоль прямой AB . Эти величины, выраженные через x, y и θ , дают нам уравнения (1.5), к которым добавим уравнение для третьей координаты.

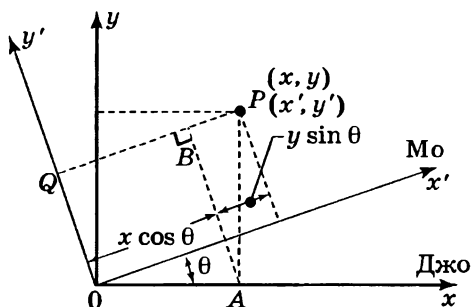


Рис. 1.2. Две координатные системы, ориентированные по-разному

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta + y \sin \theta, \\y' &= y \cos \theta - x \sin \theta, \\z' &= z.\end{aligned}\tag{1.5}$$

Следующий шаг будет аналогичен проделанному ранее: установим соотношение между силами, измеряемыми двумя наблюдателями. Предположим, что сила F , имеющая (с точки зрения Джо), компоненты F_x и F_y , действует на частицу с массой m , расположенную в точке P (см. рис. 1.2). Для упрощения перенесем обе системы координат так, чтобы начало отсчета оказалось в точке P , как показано на рис. 1.3. Мо видит составляющие F вдоль своих осей как $F_{x'}$ и $F_{y'}$. $F_{x'}$, так же как и $F_{y'}$, имеет составляющие вдоль обеих осей x' и y' . Чтобы выразить $F_{x'}$ через F_x и F_y , сложим составляющие этих сил вдоль оси x' , точно таким же образом можно выразить $F_{y'}$ через F_x и F_y . Получим

$$\begin{aligned}F_{x'} &= F_x \cos \theta + F_y \sin \theta, \\F_{y'} &= F_y \cos \theta - F_x \sin \theta, \\F_{z'} &= F_z.\end{aligned}\tag{1.6}$$

Интересно отметить важное совпадение: формулы (1.5) и (1.6), для координат точки P и компонент силы F соответственно, тождественны по форме.

Как и ранее, предположим, что законы Ньютона справедливы в системе Джо и выражаются уравнениями (1.1). Вопрос

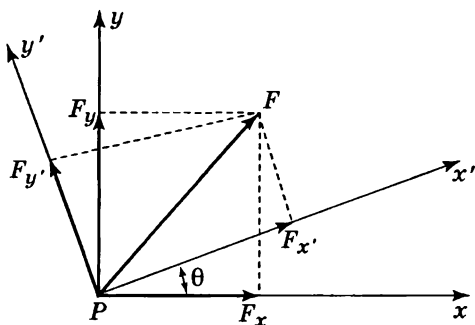


Рис. 1.3. Составляющие силы в двух системах

опять заключается в том, может ли Мо применять законы Ньютона, — будут ли результаты правильными в повернутой системе координат? Другими словами, если мы предполагаем, что формулы (1.5) и (1.6) дают нам связь между измеренными величинами, верно ли, что

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x'}{dt^2} &= F_{x'}, \\ m \frac{d^2 y'}{dt^2} &= F_{y'}, \\ m \frac{d^2 z'}{dt^2} &= F_{z'}? \end{aligned} \quad (1.7)$$

Чтобы ответить на этот вопрос, вычислим независимо левую и правую части и сравним результаты. Чтобы вычислить левые части, умножим уравнения (1.5) на m и дважды продифференцируем по времени, считая угол θ постоянным. Это дает нам

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x'}{dt^2} &= m \frac{d^2 x}{dt^2} \cos \theta + m \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \theta, \\ m \frac{d^2 y'}{dt^2} &= m \frac{d^2 y}{dt^2} \cos \theta - m \frac{d^2 x}{dt^2} \sin \theta, \\ m \frac{d^2 z'}{dt^2} &= m \frac{d^2 z}{dt^2}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Вычислим правые части уравнений (1.7), подставив уравнения (1.1) в (1.6). Получим

$$\begin{aligned} F_{x'} &= m \frac{d^2 x}{dt^2} \cos \theta + m \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \theta, \\ F_{y'} &= m \frac{d^2 y}{dt^2} \cos \theta - m \frac{d^2 x}{dt^2} \sin \theta, \\ F_{z'} &= m \frac{d^2 z}{dt^2}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Смотрите! Правые части уравнений (1.8) и (1.9) тождественны, поэтому мы делаем вывод: если законы Ньютона верны в одной системе координат, они верны и в другой. Этот результат, который установлен теперь как для переноса, так и для поворота, имеет определенные следствия. Во-первых, никто не может утверждать, что его система координат единственна; она, конечно же, может оказаться более *удобной* при решении частных задач. Например, удобно, но необязательно взять направление силы тяжести за одну из осей координат. Во-вторых, это означает, что любое оборудование, которое является замкнутым и обладает всем необходимым для создания силы, будет работать так же после поворота на некоторый угол.

1.4. Векторы

Не только законы Ньютона, но и другие законы физики, насколько мы знаем сегодня, обладают двумя свойствами, которые мы называем инвариантностью (или симметрией) относительно перемещений и поворота координатных осей. Эти свойства настолько важны, что были разработаны специальные математические методы для учета их при изучении физических законов и при их применении.

Решение поставленных задач потребовало довольно длинных математических расчетов. Для того чтобы свести их к минимуму, был разработан весьма мощный математический аппарат. Эта система, названная *векторным анализом*, и определила название этой главы, хотя, строго говоря, эта глава — о симметрии физических законов. С помощью методов, описанных ранее, можно получить искомый результат, но на практике хо-

телось бы делать это легче и быстрее, поэтому мы будем применять векторный анализ.

Для начала отметим некоторые особенности двух видов величин, являющихся важными в физике (на самом деле их больше, но начнем с двух). Величины первого типа, подобно числу картофелин в мешке, мы называем обычными числами, или *скалярами*. Еще один пример такой величины — температура. Другие важные для физики величины имеют направление, например — скорость: нам надо отследить, по какому пути движется тело, а не только быстроту его движения. Импульс и сила также имеют направление, то же относится и к смещению: когда кто-либо делает шаг, мы можем сказать, насколько далеко он ушел, а также *куда* он перешел, т. е. определить направление его движения.

Все количества, имеющие направление, подобно шагу в пространстве, называются *векторами*.

Вектор — это три числа. Чтобы описать шаг в пространстве, скажем, из начала координат в некоторую точку P с координатами (x, y, z) , нам действительно нужно три числа, но мы будем использовать математический символ, $\mathbf{r}$, который не похож на другие математические символы, используемые нами до сих пор*. Это не одно число, он задается тремя числами. Этот символ обозначает три числа, но не только эти три числа, поскольку при переходе в другую систему координат эти три числа заменились бы на x' , y' и z' . Однако мы хотим упростить нашу математику, поэтому будем использовать *один и тот же символ* для представления и тройки чисел (x, y, z) и тройки (x', y', z') . То есть мы используем один и тот же знак для представления первого набора из трех чисел в одной системе координат и второго набора, если используем другую систему координат. Это удобно потому, что при изменении системы координат нам не нужно будет менять форму уравнений. Если мы написали уравнения, используя координаты x, y, z , а затем меняем систему отсчета, мы должны изменить обозначения на x', y', z' , но будем писать просто $\mathbf{r}$, условившись, что это обозначает (x, y, z) , если используется одна система координат, и (x', y', z') — если используется другая. Три числа, описывающие векторную вели-

* В печатном тексте векторы обозначают полужирным шрифтом, в рукописном — с помощью стрелки: $\vec{r}$.

чину в данной системе координат, называются *составляющими* (компонентами) вектора в направлении координатных осей этой системы. Таким образом, мы используем один символ для обозначения трех букв, относящихся к одному и тому же объекту, рассматриваемому с точки зрения разных осей координат. Произнеся слова «один и тот же объект», мы подразумеваем некую физическую интуицию, которая говорит, что шаг в пространстве не зависит от способа измерения его компонент, так что символ $\mathbf{r}$ будет обозначать одно и то же, как мы ни ориентируем оси системы отсчета.

Теперь предположим, что имеется другая направленная физическая величина, любая другая величина, с которой также связаны три числа, например сила. Эти три числа меняются на другие три числа по строго определенному математическому правилу при изменении системы координат. Это должны быть те же самые правила, которые меняют (x, y, z) на (x', y', z') . Другими словами, вектор — это величина, определяемая тремя числами, которые преобразуются так же, как шаг в пространстве при изменении системы координат. Уравнение вида

$$\mathbf{F} = \mathbf{r}$$

справедливо в *любой* системе координат, если оно верно хотя бы в одной. Это уравнение, конечно, заменяет три уравнения

$$F_x = x, \quad F_y = y, \quad F_z = z,$$

или, соответственно,

$$F_{x'} = x', \quad F_{y'} = y', \quad F_{z'} = z'.$$

Тот факт, что физические соотношения могут быть выражены в виде векторных уравнений, гарантирует нам, что эти соотношения верны в любой системе координат. Именно поэтому векторы так удобны в физике.

Давайте теперь рассмотрим некоторые свойства векторов. В качестве примеров векторов можно упомянуть скорость, импульс, силу и ускорение. Для многих целей удобно изображать вектор в виде стрелки, указывающей направление действия. Почему мы можем представить стрелкой силу? Потому что она преобразуется по тем же законам, что и «шаг в пространстве». Так что мы изображаем ее на какой-либо диаграмме, как если бы это было перемещение, используя такой масштаб, чтобы еди-

ница силы, или ньютон, соответствовала определенной длине. Когда мы сделали это, все силы могут быть представлены как отрезки, поскольку уравнение

$$\mathbf{F} = k\mathbf{r}$$

(где k — некоторая константа) вполне законно. Благодаря этому, мы можем всегда изображать силу отрезком, что очень удобно, потому что, изобразив отрезок, мы уже не нуждаемся в осях. Конечно, мы можем быстро вычислить значения трех компонентов, когда они меняются при повороте осей — это сводится к простому геометрическому построению.

1.5. Векторная алгебра

Теперь мы должны описать законы, или правила, регулирующие возможные сочетания векторов. Прежде всего это *сложение* векторов. Пусть $\mathbf{a}$ — это вектор в некоторой системе координат с компонентами (a_x, a_y, a_z) , а $\mathbf{b}$ — другой вектор с компонентами (b_x, b_y, b_z) . Теперь составим три новых числа $(a_x + b_x, a_y + b_y, a_z + b_z)$. Образуют ли они вектор? Мы могли бы сказать: «Разумеется, ведь здесь имеются три числа, а три числа образуют вектор». Нет, *не* любые три числа образуют вектор! Чтобы получить вектор, нужно связать три числа с некоторой системой координат таким образом, чтобы при повороте системы координат эти три числа «поворачивались» одно относительно другого, «смешивались» согласно правилам, которые мы уже описали. Поэтому вопрос заключается в следующем: если мы поворачиваем систему координат, и при этом (a_x, a_y, a_z) переходит в $(a_{x'}, a_{y'}, a_{z'})$, а (b_x, b_y, b_z) переходит в $(b_{x'}, b_{y'}, b_{z'})$, во что перейдет $(a_x + b_x, a_y + b_y, a_z + b_z)$? Перейдет ли оно в $(a_{x'} + b_{x'}, a_{y'} + b_{y'}, a_{z'} + b_{z'})$ или нет? Ответ, конечно, да, потому что исходное преобразование, описанное уравнениями (1.5), представляет собой то, что мы называем *линейным* преобразованием. Если мы применим это преобразование к a_x и b_x , чтобы получить $a_{x'} + b_{x'}$, мы обнаружим, что преобразованное $a_x + b_x$ действительно то же самое, что и $a_{x'} + b_{x'}$. «Складывая» векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ по только что описанному правилу, мы получаем новый вектор $\mathbf{c}$. Можно записать это как

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}.$$

Вектор c обладает интересным свойством:

$$c = b + a,$$

которое можно получить из его компонентов. Верно также, что

$$a + (b + c) = (a + b) + c.$$

Мы можем складывать векторы в любом порядке.

Каков геометрический смысл суммы $a + b$? Предположим, что a и b изображены в виде прямых линий на листе бумаги. Как при этом будет выглядеть c ? Ответ показан на рис. 1.4. Мы видим, что сложить компоненты a с компонентами b проще всего, если расположить прямоугольники, представляющие эти компоненты, так, как показано на рисунке. Поскольку b точно «вписывается» в свой прямоугольник, также как a — в свой, это будет то же самое, что совместить «хвост» b с «головой» a , тогда стрелка из «хвоста» a к «голове» b будет вектором c . Можно поступить иначе: совместить «хвост» a с «головой» b . Согласно геометрическим свойствам параллелограмма мы получим тот же результат для c . Заметим, что векторы можно складывать подобным образом без помощи координатных осей.

Предположим, что мы умножили некоторый вектор a на некоторое число α , что это означает? Договоримся понимать под этим новый вектор с компонентами αa_x , αa_y , αa_z . Доказательство того, что это действительно вектор, мы оставляем студентам в качестве задачи.

Теперь рассмотрим вычитание векторов. Мы можем определить вычитание таким же образом, как и сложение, только компоненты не складываются, а вычитаются. Или же мы можем определить вычитание, введя понятие отрицательного вектора $-b = (-1)b$, а потом уже сложить компоненты. Оба способа дадут

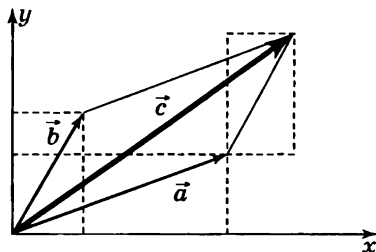


Рис. 1.4. Сложение векторов

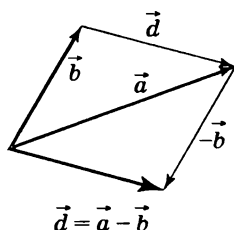


Рис. 1.5. Вычитание векторов

один и тот же результат, показанный на рис. 1.5. Из рисунка видно, что $\vec{d} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$; заметим также, что, зная $\vec{a}$ и $\vec{b}$, разность $\vec{a} - \vec{b}$ легко найти из эквивалентного соотношения $\vec{a} = \vec{b} + \vec{d}$. Так разность даже легче найти, чем сумму: чтобы получить $\vec{a} - \vec{b}$, мы просто проводим вектор от $\vec{b}$ к $\vec{a}$!

Теперь обсудим скорость. Почему скорость является вектором? Если положение задается тремя координатами (x, y, z) , то скорость задается производными dx/dt , dy/dt и dz/dt . Это вектор или нет? Дифференцируя выражения в (1.5), мы можем определить закон преобразования dx'/dt . Мы видим, что компоненты dx/dt и dy/dt действительно преобразуются по тому же закону, что и x и y . Следовательно, производная вектора является вектором. Значит, скорость *есть* вектор. Мы можем записать скорость в таком интересном виде:

$$\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt.$$

Что такое скорость, и почему она является вектором, можно понять на более ярком примере. Далеко ли передвинется некая частица за короткий промежуток времени Δt ? Ответ: на $\Delta \mathbf{r}$, поскольку, если частица находится «здесь» в один момент времени и «там» — в другой, то разность положений равна вектору $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ и направлена вдоль направления движения, как показано на рис. 1.6. Разделив эту разность на промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, получим вектор «средней скорости».

Другими словами, под вектором скорости мы понимаем предел разности радиус-векторов в моменты $t + \Delta t$ и t , деленной на Δt , при Δt , стремящемся к нулю:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta \mathbf{r} / \Delta t) = d\mathbf{r}/dt. \quad (1.10)$$

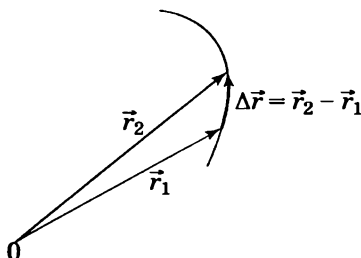


Рис. 1.6. Перемещение частицы за малое время $\Delta t = t_2 - t_1$

Таким образом, скорость — это вектор, потому что она равна разности двух векторов. Это верно также и потому, что компонентами скорости являются dx/dt , dy/dt и dz/dt . Подумав над этим, мы придем к выводу, что если мы дифференцируем по времени *любой* вектор, то получаем новый вектор. Итак, мы имеем несколько способов получения новых векторов: 1) умножением на константу, 2) дифференцированием по времени, 3) сложением или вычитанием двух векторов.

1.6. Законы Ньютона в векторной записи

Чтобы записать законы Ньютона в векторной форме, мы должны сделать еще один шаг и определить вектор ускорения. Этот вектор равен производной по времени от вектора скорости, и легко показать, что его компоненты — это вторые производные x , y и z по времени:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left(\frac{d}{dt} \right) \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}, \quad (1.11)$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}, a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (1.12)$$

После этого можно записать законы Ньютона в виде:

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad (1.13)$$

или

$$m(d^2\mathbf{r}/dt^2) = \mathbf{F}. \quad (1.14)$$

Теперь задача доказательства инвариантности законов Ньютона относительно вращения такова: доказать, что $\mathbf{a}$ (ускорение) является вектором — это мы только что проделали. Затем доказать, что $\mathbf{F}$ является вектором — мы *предполагаем*, что это так. Если сила является вектором, то уравнение (1.13) будет выглядеть одинаково в любой другой системе координат. Запись его в форме, не содержащей в явном виде x , y и z , имеет то преимущество, что не нужно писать *три* уравнения каждый раз, когда мы пишем законы Ньютона или другие законы физики. Мы записываем то, что выглядит как *один* закон, но в действительности, конечно, это три закона для любой конкретной системы координат, потому что любое векторное уравнение содержит утверждение, что соответствующие составляющие равны.

Тот факт, что ускорение — это скорость изменения вектора скорости, помогает нам вычислить ускорение в некоторых довольно сложных ситуациях. Предположим, например, что некая частица движется по некоторой сложной кривой (рис. 1.7) и что в момент t_1 она имеет скорость $\mathbf{v}_1$, а в другой момент t_2 — другую скорость $\mathbf{v}_2$. Чему равно ускорение? Ответ: ускорение равно разности скоростей, деленной на маленький промежуток времени, значит нам надо найти эту разность скоростей. Как же найти разность скоростей? Чтобы найти разность векторов, мы проводим вектор между концами $\mathbf{v}_2$ и $\mathbf{v}_1$; то есть мы чертим $\Delta\mathbf{v}$ как разность между двумя векторами. Верно? *Нет!* Это справедливо только тогда, когда *начала* векторов находятся в одной точке! Вычитать векторы, приложенные к разным точкам, бессмысленно, так что будьте бдительны! Мы должны начертить новую схему для вычитания векторов. На рис. 1.8 векторы $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$ изображены равными и параллельными своим двойникам из рис. 1.7, и теперь мы сможем поговорить об ускорении. Конеч-

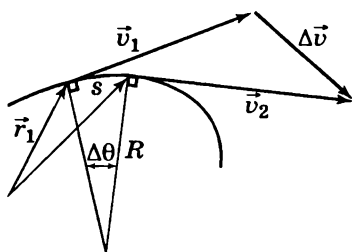


Рис. 1.7. Криволинейная траектория

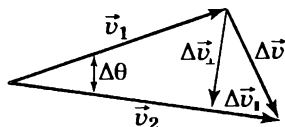


Рис. 1.8. Диаграмма для вычисления ускорения

но, ускорение — это просто $\Delta v/\Delta t$. Интересно отметить, что разность скоростей можно разделить на две части; мы можем полагать, что ускорение состоит из *двух составляющих*, $\Delta v_{\parallel}$ — вектора, параллельного касательной к траектории, и $\Delta v_{\perp}$, перпендикулярного к этой касательной, как показано на рис. 1.8. Ускорение по касательной к траектории, конечно же, это изменение *длины* вектора, т. е. изменение *скорости* v :

$$a_{\parallel} = dv/dt. \quad (1.15)$$

Другую составляющую ускорения, перпендикулярную к касательной, легко вычислить, используя рис. 1.7 и 1.8. За короткий промежуток времени Δt изменение угла между v_1 и v_2 составит малый угол $\Delta\theta$. Если величина скорости обозначена через v , то

$$\Delta v_{\perp} = v\Delta\theta,$$

и ускорение a составит

$$a_{\perp} = v(\Delta\theta/\Delta t).$$

Теперь надо узнать $\Delta\theta/\Delta t$, что можно сделать следующим образом. Если в данный момент времени приблизительно заменить кривую окружностью некоторого радиуса R , тогда за время Δt расстояние $s = v\Delta t$, где v — скорость. Изменение угла равно

$$\Delta\theta = v(\Delta t/R), \quad \text{или} \quad \Delta\theta/\Delta t = v/R.$$

Следовательно, мы найдем, что

$$a = v^2/R, \quad (1.16)$$

как мы видели раньше.

1.7. Скалярное произведение векторов

Продолжим изучение свойств векторов. Легко видеть, что *длина шага* в пространстве одинакова в любой системе координат. То есть, если конкретный шаг $\mathbf{r}$ представлен координатами x, y, z в одной системе и координатами x', y', z' — в другой, то расстояние $r = |\mathbf{r}|$ должно быть одинаковым в обеих системах. Имеем

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

и

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}.$$

Теперь мы хотим удостовериться, что эти величины равны. Чтобы не связываться с квадратными корнями, будем сравнивать квадраты расстояний, то есть, мы должны определить, выполняется ли равенство

$$x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2. \quad (1.17)$$

Подставив в это уравнение определенные соотношением (1.5) значения x', y', z' , убедимся, что так оно и есть. Значит, мы имеем еще одно равенство, справедливое для любых систем координат.

Появилось нечто новое. Мы можем построить новую величину, функцию x, y и z , называемую *скалярной функцией*, — величину, не имеющую направления, но одинаковую в обеих системах. Мы можем получать из вектора скаляр. Надо найти общее правило для этого построения. Ясно, что это правило мы только что нашли: надо сложить квадраты компонентов. Давайте теперь обозначим наше новообразование через $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}$. Это не вектор, а скаляр; это число, одинаковое в любой системе координат, и оно определено как сумма квадратов трех компонентов вектора:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2. \quad (1.18)$$

Вы можете спросить: «Но в какой системе координат?» Но это число не зависит от системы координат, поэтому ответ одинаков в *любой* системе координат. Так что теперь мы имеем новый *вид*

величины, новый *инвариант* или *скаляр*, полученный из «возведенного в квадрат» вектора. Если теперь определим следующую величину для двух векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z, \quad (1.19)$$

то мы найдем, что эта величина совпадает в системах со штрихом и без штриха. Чтобы доказать это, заметим, что (1.19) верно для $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}$, $\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}$ и $\mathbf{c} \cdot \mathbf{c}$, где $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$. Поэтому сумма квадратов $(a_x + b_x)^2 + (a_y + b_y)^2 + (a_z + b_z)^2$ будет инвариантом:

$$\begin{aligned} (a_x + b_x)^2 + (a_y + b_y)^2 + (a_z + b_z)^2 = \\ = (a_{x'} + b_{x'})^2 + (a_{y'} + b_{y'})^2 + (a_{z'} + b_{z'})^2. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Если раскрыть скобки и привести подобные члены, то останутся только перекрестные произведения как раз такого вида, как в (1.19), а также суммы квадратов компонентов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$. Из инвариантности (1.18) следует, что выражение (1.19) тоже инвариантно.

Величина $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ называется скалярным произведением двух векторов, $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, и имеет много интересных и полезных свойств. Например, легко доказать, что

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}. \quad (1.21)$$

Существует также простой геометрический способ вычисления $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$, не требующий вычисления компонентов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$: $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ равно произведению длин векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, умноженному на косинус угла между ними. Почему? Предположим, что мы выбрали специальную систему координат, в которой $\mathbf{a}$ направлен вдоль оси x ; тогда единственным компонентом $\mathbf{a}$ будет a_x , равный, естественно, всей длине вектора $\mathbf{a}$. Уравнение (1.19) в этом случае сведется к $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x$, что равно длине $\mathbf{a}$, умноженной на компонент $\mathbf{b}$ по направлению $\mathbf{a}$, т. е. на $b \cos \theta$:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \theta.$$

Следовательно, в частной системе координат мы доказали, что $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ равно произведению длин векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ на косинус угла θ между ними. Но если это верно в одной системе координат, это верно во всех системах, потому что $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ независимо от системы координат.

Что дает нам это произведение «с точкой»? Есть ли случаи в физике, когда скалярное произведение нам необходимо? Да, оно нужно нам постоянно. Например, в главе 4* кинетической энергией была названа величина $\frac{1}{2}mv^2$, но если объект движется в пространстве, нужно использовать сумму квадратов скоростей по направлениям осей x , y и z , так что согласно векторному анализу формула кинетической энергии имеет вид

$$\text{К.Э.} = \frac{1}{2}m(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2). \quad (1.22)$$

Энергия не имеет направления. Импульс же имеет направление, это — вектор, равный массе, умноженной на вектор скорости.

Еще один пример скалярного произведения — работа, производимая силой при перемещении предмета из одного места в другое. Мы пока не давали определения работы, но она равна изменению энергии (например при поднятии тяжести), когда сила $\mathbf{F}$ действует на пути $\mathbf{s}$:

$$\text{Работа} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}. \quad (1.23)$$

Иногда удобно говорить о компоненте вектора в заданном направлении (скажем, вертикальном, поскольку это направление силы тяжести). Для этого удобно ввести *единичный вектор* в направлении, которое нас интересует. Под единичным вектором мы понимаем такой вектор, скалярное произведение которого на самого себя равно единице. Пусть это будет вектор $\mathbf{i}$; тогда $\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$. Скалярное произведение $\mathbf{a} \cdot \mathbf{i}$ равно $a \cos \theta$, т. е. оно равно компоненту a в направлении $\mathbf{i}$. Это удобный способ получения компонента; на самом деле это позволяет нам получить все компоненты и написать довольно любопытные формулы.

Предположим, что в некоторой заданной системе координат, x , y и z , мы ввели три вектора: $\mathbf{i}$ — единичный вектор по направлению x ; $\mathbf{j}$ — единичный вектор по направлению y ; и $\mathbf{k}$ — единичный вектор по направлению z . Ясно, что $\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$. Что такое $\mathbf{i} \cdot \mathbf{j}$? Когда два вектора расположены под прямым углом, их скалярное произведение равно нулю. Следовательно,

* в первоначальных «Лекциях по физике», том I.

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = 0 \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = 1 \quad (1.24)$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{k} = 0 \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = 0 \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1$$

Используя эти свойства векторов $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ и $\mathbf{k}$, мы можем записать любой вектор в виде

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}. \quad (1.25)$$

Таким способом мы можем перейти от компонентов вектора к самому вектору.

Данное обсуждение векторов отнюдь не является полным. Однако прежде чем пытаться углубиться в эту тему, научимся сначала использовать изложенные идеи в физике. После того как мы в достаточной мере овладеем основным материалом, мы обнаружим, что более глубокое проникновение в рассматриваемые проблемы дается нам гораздо легче. Позднее мы узнаем, что полезно определить еще один вид произведения двух векторов, которое называется векторным произведением и записывается как $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$. Однако отложим обсуждение этих вопросов до более поздних глав.



2

Симметрия законов физики

2.1. Операции симметрии

Темой данной главы является то, что можно назвать *симметрией физических законов*. Мы уже обсуждали некоторые стороны симметрии в связи с векторным анализом (гл. 1), теорией относительности (это будет в гл. 4) и вращением (гл. 20^{*}).

Почему нас так интересует симметрия? Прежде всего, симметрия привлекательна для человека; всем нравятся объекты, симметричные в каком-либо отношении. Интересно, что природа буквально заполнена разными видами симметрии в окружающем нас мире. Пожалуй, наиболее симметричный объект, который можно придумать, — это сфера, и природа наполнена сферами — звезды, планеты, капли воды в облаках и т. д. Найденные в горах кристаллы демонстрируют многообразные виды симметрии, изучение которой позволяет нам заглянуть внутрь вещества и получить важные сведения о структуре твердого тела. Даже животный и растительный миры показывают определенную степень симметрии, хотя симметрия цветка или пчелы не столь совершенна, как симметрия кристалла.

Но наш главный интерес заключен не в симметрии предметов. Скорее, мы хотим изучить некоторые из наиболее замечательных симметрий Вселенной — симметрии *основных законов*, управляющих процессами физического мира.

Однако, что такое симметрия? Как может физический закон быть «симметричным»? Проблема определения симметрии — одна из основных. Мы уже отмечали, что Вейль дал хорошее определение, суть которого такова: вещь считается симметричной, если мы можем с ней что-то сделать таким образом, что по-

* в первоначальных «Лекциях по физике», том I.

сле этого она выглядит так же, как раньше. Например, симметричная ваза такова, что при отражении в зеркале или повороте она выглядит так же, как и до этого. Вопрос, который мы хотим разобрать здесь: что мы можем сделать с физическим явлением или с физической ситуацией в эксперименте, чтобы результат при этом оставался прежним. Список операций симметрии, при которых различные физические явления остаются неизменными, приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Операции симметрии

Перенос в пространстве
Перемещение во времени
Поворот на фиксированный угол
Постоянная прямолинейная скорость (преобразования Лоренца)
Обращение времени
Отражение пространства
Перестановка атомов или одинаковых частиц
Изменение квантово-механической фазы
Материя-антиматерия (сопряжение зарядов)

2.2. Симметрия в пространстве и времени

Первое, что мы можем попытаться сделать, это *переместить* явление в пространстве. Если мы проводим эксперимент в некотором месте, а затем создаем другое устройство в другом месте (или переносим туда старое) и повторяем наш опыт, то все должно повториться в той же временной последовательности, если мы обеспечим те же самые условия. При этом, конечно, все особенности окружающей среды, которые могут заставить устройство вести себя иначе, также должны быть перенесены — мы уже говорили о том, как определить, что именно надо учитывать в этих обстоятельствах, и не будем снова вдаваться в детали.

Сегодня мы также полагаем, что *перемещение во времени* не окажет влияния на физические законы. (Точнее, *насколько нам известно сегодня!*) Это означает, что если мы строим определенный аппарат и запускаем его в определенное время, скажем, в четверг в 10 часов утра, а затем строим такой же аппарат и запускаем его, например, через три дня при тех же условиях, оба аппарата будут совершать те же действия, в той же последователь-

ности, независимо от времени запуска. Конечно, при этом снова подразумевается, что основные особенности окружающей среды также видоизменены в соответствии со *временем*. Такая симметрия означает, конечно, что если некто купил акции Джене-рал Моторс три месяца назад, с ними произошло бы то же самое, как если бы он купил их сегодня!

Мы должны также отслеживать географические различия, потому что с изменением положения на Земле некоторые характеристики могут меняться. Поэтому, если, например, мы изменяем магнитное поле в некотором районе и переносим наш аппарат в другой район, он может работать не совсем так же, поскольку магнитное поле — другое, но мы говорим, что это происходит из-за магнитного поля Земли. Мы можем представить себе, что, если бы мы переместили оборудование вместе с земным шаром, работа аппаратуры не отличалась бы от прежней.

Еще один вопрос, который мы детально обсудили, это вращение в пространстве: если мы поворачиваем аппаратуру на некоторый угол, то она работает так же, как и раньше, при условии, что мы повернули при этом всё, что существенно для ее работы. Мы довольно детально обсудили проблему симметрии при вращении в гл. 1 и создали математическую систему, названную векторным анализом, позволяющую достаточно полно и изящно учитывать вращательную симметрию.

На более высоком уровне мы имели другую симметрию — симметрию при равномерном и прямолинейном движении. Это довольно интересный эффект. Если работающий аппарат (со всем существенным окружением) поместить в автомобиль и заставить двигаться прямолинейно и с постоянной скоростью, тогда все, происходящее внутри автомобиля, остается прежним: все законы физики остаются точно такими же. Нам даже известно, как выразить это более точно: математические уравнения физических законов должны оставаться неизменными при *преобразовании Лоренца*. Кстати, именно изучение проблемы относительности заставило физиков сосредоточить свое внимание на симметриях в физических законах.

Все вышеупомянутые симметрии имеют геометрическую природу, пространство и время более или менее тоже, но существуют симметрии совсем другого рода. Например, мы можем заменить один атом на другой атом того же вида; говоря иначе, существуют атомы одного и того же вида. То есть существуют такие группы атомов, что, если мы переставим пару из них мес-

тами, ничего не изменится — атомы идентичны. То, что может сделать один атом кислорода, может сделать и другой того же типа.

Кто-то может возразить: «Смешно, это же просто *определение* атомов одинаковых типов!» Возможно, это просто определение, но до опыта мы не знали, существуют ли «атомы того же самого типа»; *факт* заключается в том что существует много-много атомов одного и того же типа. Поэтому имеет определенный смысл говорить о том, что ничего не меняется при замене одного атома на другой атом того же типа. Так называемые элементарные частицы, из которых состоят атомы, также являются идентичными в указанном выше смысле — все электроны одинаковы, все протоны одинаковы, все положительные пионы одинаковы и так далее.

После такого долгого перечисления того, что можно сделать, не оказывая влияния на физические явления, может показаться, что мы можем делать практически всё; поэтому давайте рассмотрим некоторые примеры, просто чтобы увидеть разницу. Предположим, мы задаем вопрос: «Симметричны ли физические законы при изменении масштаба?» Предположим, что мы построили некий аппарат, а затем строим его копию, увеличенную в пять раз. Будет ли копия работать таким же образом? Ответ в этом случае — *нет!* Длина волны света, излучаемого, например, атомами натрия, находящимися внутри коробки, и длина волны света, излучаемого газом атомов натрия, занимающих в пять раз больший объем, не будет различаться в пять раз, а будет той же самой. Так что изменится отношение длины волны к размеру излучателя.

Другой пример: мы изредка видим в газете фотографии моделей знаменитых соборов, сделанных из маленьких спичек — потрясающе искусная работа некоего отставника, клеящего из спичек различные вещи. Это сложнее и удивительнее настоящего собора. Если мы представим себе, что этот деревянный собор построен в масштабе настоящего, то сразу поймем, в чем беда; он долго не простоит — все сооружение рухнет из-за того, что увеличенные модели из спичек недостаточно прочны. Могут заметить: «Да, но ведь существует внешнее влияние, его тоже надо пропорционально изменить!» Мы говорим здесь о способности объекта противостоять силе тяжести. Значит, когда мы взяли модель собора из реальных спичек и реальную Землю, и тогда все было устойчиво. Потом мы должны были бы взять уве-

личный собор и увеличенную Землю. Но это еще хуже, потому что сила тяжести станет еще больше!

Конечно, мы понимаем, что в основе зависимости явления от размеров лежит атомная природа строения вещества, и если бы нам удалось построить настолько маленький аппарат, что в нем было бы всего пять атомов, то это, со всей очевидностью, будет нечто, масштаб чего мы не сможем произвольно увеличивать или уменьшать. Ведь размер отдельного атома вовсе не произволен — он совершенно определенный.

Факт, что законы физики не остаются такими же при изменении масштаба, был открыт Галилеем. Он понял, что прочность материалов изменяется не в прямой пропорции с их размерами. Он иллюстрировал это свойство на примере, очень похожем на спичечный собор, нарисовав два скелета — собаки, в правильной пропорции для поддержания ее веса, и воображаемой «сверхсобаки», которая была бы, скажем, в десять или тысячу раз крупнее. Получилось нечто весьма солидное и имело совсем другие пропорции. Мы не знаем, привел ли Галилея этот аргумент к выводу, что законы природы должны иметь определенный масштаб, но на него это открытие произвело такое впечатление, что он счел его столь же важным, как открытие законов движения. Именно поэтому он опубликовал оба этих открытия в одном томе, под названием «О двух Новых Науках».

Еще один хорошо известный нам пример несимметричных законов таков: для системы, вращающейся с постоянной угловой скоростью, законы физики будут выглядеть не так, как у системы, которая не вращается. Если мы проведем эксперимент, а затем перенесем всю аппаратуру на космический корабль и заставим корабль вращаться в межпланетном пространстве с постоянной угловой скоростью, наша аппаратура не будет функционировать так, как раньше, из-за наличия центробежных или кориолисовых сил. На самом деле, мы можем узнать, что Земля вращается, наблюдая так называемый маятник Фуко, нам вовсе не нужно для этого смотреть на нее со стороны.

Дальше мы рассмотрим очень интересную симметрию — *обратимость времени*. На первый взгляд кажется, что это невозможно, что физические законы не могут быть обращены во времени: «Движущийся палец пишет и, написав, движется дальше». Насколько мы можем судить, эта необратимость обусловлена очень большим числом участвующих частиц, а если бы мы видели отдельные молекулы, мы не могли бы опреде-

лить, в каком направлении работает система — вперед или назад. Представим это поточнее: мы строим аппарат, в котором нам известно, что делают все атомы, в котором мы можем видеть даже покачивание атомов. Теперь строим другой аппарат, подобный первому, но который начинает свое движение в условиях окончания работы первого и при этом все скорости заменены на противоположные. *Тогда он пройдет все этапы того же движения, но строго в обратном порядке.* Выразим это иначе: если мы снимем фильм, учитывающий мельчайшие детали, все внутренние процессы в веществе, и прокрутим его в обратную сторону, ни один физик не сможет сказать: «Это противоречит законам физики, здесь что-то не так!» Если же не видно деталей, то все становится совершенно ясно. Например, если мы видим яйцо, падающее на тротуар, затем видим, как ломается скорлупа и так далее, тогда мы с уверенностью говорим: «Это необратимо, потому что, если прокрутим пленку назад, яйцо соберется в целое, скорлупа восстановится на своем месте, а это просто смешно!» Но если мы наблюдаем за отдельными атомами, законы кажутся полностью обратимыми. Конечно, сделать такое открытие гораздо труднее, но явно справедливо, что фундаментальные физические законы, управляющие атомами и молекулами, обратимы во времени!

2.3. Симметрия и законы сохранения

Симметрии физических законов весьма увлекательны на этом уровне, но оказываются еще более интересными и волнующими, когда мы переходим к квантовой механике. По причине, которую я не могу объяснить на вашем уровне знаний, факт, который большинство физиков находит поразительным, глубоким и красивым, заключается в том, что в квантовой механике *для каждого из правил симметрии имеется соответствующий закон сохранения* — есть определенная связь между законами сохранения и симметриями физических законов. Сейчас мы можем только констатировать это без попыток объяснения.

Тот факт, например, что законы физики обладают симметрией при перемещении в пространстве, с учетом принципов квантовой механики будет означать *сохранение импульса*.

То, что законы симметричны при перемещении во времени, в квантовой механике означает *сохранение энергии*.

Инвариантность (неизменность) при повороте на фиксированный угол в пространстве соответствует *сохранению момента количества движения*. Эти связи принадлежат к наиболее красивым и глубоким идеям физики.

Между прочим, существуют некоторые симметрии, возникающие в квантовой механике, которые, к несчастью, не имеют классических аналогов, не имеют способов их описания в классической физике. Одна из них такова. Если ψ — амплитуда некоторого процесса, то мы знаем, что квадрат модуля ψ представляет собой вероятность этого процесса. Если теперь кто-то другой проведет свои вычисления, не с ψ , а с ψ' , отличающейся на смещение по фазе (т. е. старая ψ умножается на $e^{i\Delta}$, где Δ — константа), то квадрат модуля ψ' , равный вероятности события, равен квадрату модуля ψ :

$$\psi' = \psi e^{i\Delta}; \quad |\psi'|^2 = |\psi|^2. \quad (2.1)$$

Следовательно, физические законы не меняются от того, что фаза волновой функции смещена на произвольную константу. Это еще одна симметрия. Физические законы имеют такую природу, что смещение квантово-механической фазы не оказывает на них влияния. Как мы только что упомянули, в квантовой механике существует закон сохранения для каждой симметрии. По-видимому, закон сохранения, связанный с квантово-механической фазой, это *сохранение электрического заряда*. Все это чрезвычайно интересно!

2.4. Зеркальные отражения

Следующий вопрос, который будет занимать нас на протяжении оставшейся части данной главы, — это симметрия при *отражении в пространстве*. Проблема такова: являются ли физические законы симметричными при отражении? Мы можем изложить ее и по-другому. Предположим, мы создаем некоторое устройство, скажем, часы с множеством колесиков, стрелок и цифр; они тикают, они ходят и имеют внутри устройство для завода. Посмотрим на эти часы в зеркале. Как они *выглядят* в зеркале — это не вопрос. Но давайте реально *создадим* другие часы, которые в точности совпадают с отражением первых часов в зеркале — каждый раз, когда мы встречаем винтик с правой резьбой, мы используем в соответствующем месте винтик с

левой резьбой; если на циферблате первых часов стоит «XII», на циферблате вторых часов мы ставим «IIX»; вместо каждой пружины мы ставим пружину с обратным закручиванием. Когда мы все закончим, получится двое часов, которые относятся друг к другу как объект и его отражение и при этом, подчеркиваем, являются материальными объектами. Вопрос теперь таков: если и те и другие часы запускаются в одинаковых условиях, с пружинами, закрученными до соответствующих положений, будут ли часы тикать и идти, оставаясь точными зеркальными отражениями друг друга? (Это физический, а не философский вопрос.) Наша интуиция относительно законов физики подсказывает, что *будут*.

Мы могли бы подозревать, что, по крайней мере в случае с часами, отражение в пространстве является одной из симметрий физических законов, что если мы поменяем все «правое» на «левое», а остальное оставим как прежде, то никакой разницы при этом мы не обнаружим. Давайте тогда предположим на мгновение, что это верно. Если это так, тогда никакое физическое явление не даст нам возможности различать «правое» и «левое», так же как, например, невозможно определить абсолютную скорость частицы никаким физическим опытом. И никакой физический опыт не сможет помочь нам абсолютно определить, что мы имеем в виду под «правым» и «левым», так как физические законы должны быть симметричны.

Конечно же, мир не *должен* быть симметричным. Например, мы можем уверенно определить «правое», если взять то, что мы называем «географией». Например, мы находимся в Нью-Орлеане и смотрим в сторону Чикаго. Тогда Флорида будет находиться справа от нас (если ноги стоят на Земле!). Так что в географии мы можем определить «правое» и «левое». Конечно, конкретная ситуация в любой системе не обязана иметь симметрию, о которой мы сейчас говорим; вопрос в том, симметричны ли *законы*. Другими словами, *противоречит ли физическим законам* наличие подобного Земле шара с «левосторонней почвой» и людьми вроде нас, стоящими в некотором месте, похожем на Нью-Орлеан, и глядящими на город, похожий на Чикаго, но во всем остальном перевернутым наоборот, так что Флорида оказывается с другой стороны. И это — поменять все правое на левое — не кажется невозможным или противоречащим законам физики.

Другой момент — наше определение «правого» не должно зависеть от истории. Простой способ отличить правое от левого —

это пойти в магазин запчастей и взять наугад любой винт. Скорее всего у него будет правая резьба — это не обязательно, но шансов встретить левую резьбу гораздо меньше. Это вопрос истории, условности или привычки, и опять это не вопрос фундаментальных законов. Ведь любой мог бы начать производить винты с левой резьбой!

Поэтому попытаемся найти такое явление, где «правизна» участвовала бы фундаментально. Рассмотрим следующую возможность. Известно, что поляризованный свет вращает плоскость поляризации, когда он проходит через, например, раствор сахара в воде. Как мы видели в главе 33*, она вращается вправо при определенной концентрации сахара. Это способ определения «правого», поскольку, растворив нужное количество сахара в воде, мы можем повернуть плоскость поляризации вправо. Но сахар получают из органического мира, а если мы попытаемся создать сахар искусственно, то обнаружим, что он *не* поворачивает плоскость поляризации! Если же мы возьмем этот самый искусственный сахар, который не вращает плоскость поляризации, поместим в него бактерии (они съедят часть сахара), а затем отфильтруем бактерии, то обнаружим, что сахар еще остался (почти половина от того, что было) и что на этот раз он вращает плоскость поляризации, но в *другую* сторону! Это сбивает с толку, но легко объяснимо.

Возьмем другой пример: протеин (белок) — это вещество, имеющееся во всех живых существах и являющееся важным для жизни. Протеин состоит из цепочек аминокислот. На рис. 2.1 показана модель аминокислоты, выделенной из протеина. Эта аминокислота называется аланином, и ее молекулярное строение выглядит так, как показано на рис. 2.1 (слева), если она получена из белка живого существа. С другой стороны, если мы попытаемся создать аланин из углекислого газа, этана и аммиака (а мы *можем* сделать это, молекула несложная), то обнаружим, что создали равное количество таких молекул и молекул, похожих на ту, что изображена на рис. 2.1 (справа)! Первая молекула, та, что получена из живого существа, называется *L-аланином*. Другая молекула, химически совпадающая с первой, имеющая такие же атомы и такие же связи между ними, является «правой», в отличие от «левой» молекулы *L-аланина*, и называется *D-аланином*. Интересно, что когда мы создаем

* в первоначальных «Лекциях по физике», том I.

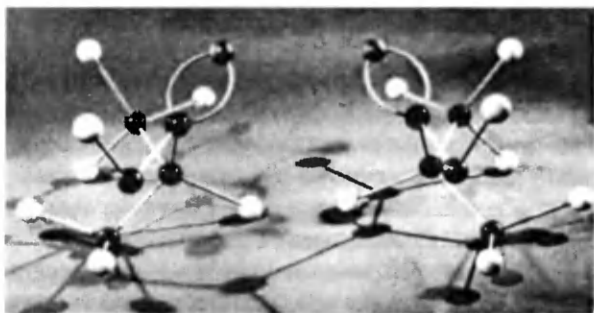


Рис. 2.1. Модели молекул аланина:
L-аланин (слева) и D-аланин (справа)

аланин в лабораторных условиях из простых газов, то получаем смесь в равных количествах молекул обоих видов. Однако живые существа используют только L-аланин. (Это не совсем так. Некоторые существа в особых случаях используют D-аланин, но это происходит очень редко. Во все белки входит исключительно L-аланин.) Теперь, если мы создали молекулы обоих типов и скармливаем эту смесь какому-нибудь животному, которое «ест» его (т. е. усваивает аланин), то оно «съест» только L-аланин, не трогая D-аланина. Именно это случилось с нашим сахаром: после того, как бактерии съели тот сахар, что подходит им, остался только «неправильный» вид! (Левосторонний сахар тоже имеет сладкий вкус, но все же не такой, как правосторонний.)

Итак, кажется, явления жизни позволяют нам сделать различие между «правым» и «левым», либо это позволяет сделать химия, поскольку две молекулы различаются химически. Но нет, это не так! Если провести физические измерения энергии, скорости химических реакций и так далее, оба вида ведут себя совершенно одинаково, если и все остальное тоже брать в зеркальном отражении. Одна молекула будет поворачивать свет направо, а другая налево точно на ту же величину, при том же количестве жидкости. Насколько мы понимаем ситуацию сегодня, согласно принципам уравнения Шрёдингера обе молекулы будут вести себя точно одинаковым образом — то, что для одной будет направо, для другой будет налево. Тем не менее, в природе все идет в одну сторону!

Как полагают, причина этого заключена в следующем. Предположим, например, что жизнь в некоторый момент оказалась в такой ситуации, что все протеины в некоторых существах содержали только левосторонние аминокислоты, тогда все ферменты и другие субстанции перекошились, стали несимметричными. Так что, когда пищеварительные ферменты пытаются преобразовать химические вещества в пищу из одного вида в другой, одни вещества «подходят» им, а другие — нет (как Золушка и туфелька, за исключением того, что мы примеряем ее на «левую ногу»). Насколько нам известно, в принципе можно создать лягушку, например, в которой все молекулы перевернуты, т. е. создать зеркальное отражение реальной лягушки; у нас — левосторонняя лягушка. Эта левосторонняя лягушка могла бы вполне нормально существовать, но ей будет нечего есть, потому что, если она проглотит муху, ее ферменты не способны эту муху переваривать. У мухи не тот «тип» аминокислот (если только мы не дадим ей левостороннюю муху). Так что, насколько мы знаем, химические и жизненные процессы, если бы все оказалось перевернутым, продолжались бы точно таким же образом.

Если жизнь — это всецело физические и химические процессы, то факт закрученности протеинов в одном направлении мы можем понять из того простого соображения, что в самом начале, случайно, «стартовали» некоторые живые молекулы и один вид победил. Где-то, когда-то, одна органическая молекула оказалась закручена определенным образом, и от этой конкретной молекулы развилась «правизна», характерная для нашей жизни; конкретный исторический случай создал одностороннюю ситуацию, и эта односторонность распространилась повсюду. Оказавшись в том состоянии, которое мы имеем сегодня, она, конечно, будет продолжаться всегда — все ферменты переваривают правые вещества, создают правые вещества; ферменты, производящие сахар, делают его односторонним, поскольку они сами односторонние. Если бы в более позднее время возникла новая разновидность вируса или живого существа, то она смогла бы выжить, только если бы могла питаться уже существующим типом органических веществ. Поэтому и она должна быть такого же вида.

Для правосторонних молекул не существует закона сохранения их числа. Однажды возникнув, они могут только увеличивать свое количество. Так что предположение заключается

в том, что жизненные явления говорят нам не об отсутствии симметрии в физических законах, но, напротив, показывают универсальность природы и общность происхождения всех существ на Земле в описанном выше смысле.

2.5. Полярный и аксиальный векторы

Двинемся дальше. Мы замечаем, что в физике существует много примеров, где мы имеем «левосторонние» и «правосторонние» правила. Когда мы изучали векторный анализ, то узнали правило правой руки, которое должны применять, чтобы верно определить направление момента количества движения, вращающего момента, магнитного поля и так далее. Например, сила, действующая на заряд в магнитном поле, равна $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. В данной ситуации, когда мы знаем $\mathbf{F}$, $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$, не достаточно ли этого уравнения для определения правосторонности? На самом деле, если мы вернемся назад и посмотрим, откуда появились эти векторы, то поймем, что «правило правой руки» было простым соглашением; это была хитрость. Первоначальные величины, вроде моментов количества движения и угловых скоростей, вовсе не являлись настоящими векторами! Все они как-то связаны с некоторой плоскостью, и только потому, что наше пространство имеет три измерения, мы смогли связать эти величины с направлением, перпендикулярным к этой плоскости. Из двух возможных направлений мы выбрали «правостороннее».

Представьте, что если бы некий демон проник во все физические лаборатории и поменял слово «право» на «лево» во всех книгах, где указаны «правила правой руки», и вместо них мы все использовали «правила левой руки», то физики бы просто не заметили этого, ибо не было бы никакой разницы с точки зрения физических законов, если законы физики симметричны.

Давайте дадим иллюстрацию. Существуют два вида векторов. Есть обыкновенные, «настоящие» векторы, например шаг $\Delta \mathbf{r}$ в пространстве. Если в нашем аппарате имеется некая часть «здесь» и что-то еще «там», то в зеркально отраженном аппарате будет присутствовать отражение части и отражение того же самого «чего-то», а если мы проведем вектор от «сюда» до «туда», то один вектор будет зеркальным отражением другого (рис. 2.2). Вектор изменил свое направление, так же как все пространство повернулось в другую сторону. Такой вектор мы называем *полярным вектором*.



Рис. 2.2. Шаг в пространстве и его зеркальное отражение

Но другой тип вектора, связанный с вращением, имеет иную природу. Например, пусть в трехмерном пространстве что-нибудь вращается, как показано на рис. 2.3. Если мы посмотрим на это в зеркале, оно будет вращаться, как указано, а именно, как зеркальное отражение первоначального вращения. Условимся представлять отраженное вращение по тому же правилу. В результате мы получим «вектор», который *не* меняется как полярный вектор, но перевернут относительно полярных векторов и геометрии пространства; такой вектор называется *аксиальным вектором*.

Если закон о симметрии отражения справедлив в физике, тогда уравнения должны быть устроены таким образом, что, если мы в соответствии с отражением поменяем знак каждого аксиального вектора и каждого векторного произведения, ничего не произойдет. Например, если мы напишем выражение для углового момента $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$, это выражение останется верным, потому что при переходе к левой системе координат мы изменили знак $\mathbf{L}$, хотя и $\mathbf{p}$ и $\mathbf{r}$ не изменились. Кроме того изменился знак векторного произведения, поскольку мы должны перейти от правила правой руки к правилу левой руки. Другой пример. Мы знаем, что сила, действующая на заряд в магнитном поле, равна $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, но если мы перейдем от правой системы координат к левой, то, поскольку $\mathbf{F}$ и $\mathbf{v}$ — полярные векторы, изменение знака векторного произведения должно компенсироваться изменением знака $\mathbf{B}$, откуда следует, что $\mathbf{B}$ должен быть аксиальным вектором. Другими словами, при таком отражении $\mathbf{B}$ должно перейти в $-\mathbf{B}$. Если мы меняем систему координат

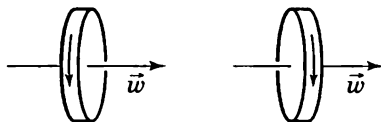


Рис. 2.3. Вращающееся колесо и его зеркальное отражение.

Заметьте, что «вектор» угловой скорости
не изменил направления

с правой на левую, то должны также поменять полюса магнита с северного на южный.

Давайте посмотрим на примере, как это получается. Предположим, у нас есть два магнита, как на рис. 2.4. На одном из магнитов намотана проволочная спираль, и ток по ней идет в определенном направлении. Второй магнит похож на отражение первого в зеркале — проволока намотана в другую сторону, и все, что происходит внутри катушки — повернуто наоборот, и ток течет так, как показано на рисунке. Из законов магнетизма (которые мы пока официально не знаем, но которые почти наверняка проходили в школе) следует, что магнитное поле направлено так, как показано на рис. 2.4. В одном случае полюс является южным магнитным полюсом, а в другом — северным, так как у него ток направлен в другую сторону, а магнитное поле перевернуто. Отсюда видно, что, когда мы переходим с правой системы на левую, мы на самом деле должны поменять север на юг!

Не смущайтесь переменной севера на юг — это просто условности. Давайте поговорим о самом *явлении*. Предположим теперь, что электрон движется от нас в магнитном поле и направляется в сторону данной страницы. Тогда, если мы применим формулу для силы $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (помните, что заряд отрицательный), то получим, что он отклонится в указанном направлении в соответствии с этим физическим законом. Так что явление заключается в том, что если в катушке течет ток в определенном направлении, то электрон отклонится определенным образом — это физика, и неважно как мы все называли.

Теперь сделаем такой же эксперимент с участием зеркала: мы посылаем электрон в соответствующем направлении, и если теперь вычислить силу по тому же правилу, то сила поменяет направление, и это верный результат, потому что соответствующее *движение* является зеркальным отражением!

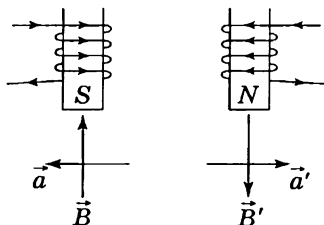


Рис. 2.4. Электромагнит и его зеркальное отражение

2.6. Какая же рука — правая?

Фактом является то, что при изучении любого явления правило правой руки встречается два или четное количество раз, и в результате явления всегда выглядят симметричными. Короче говоря, мы не можем отличить правое от левого, если мы не можем отличить север от юга. Однако нам кажется, что определить, где находится северный полюс магнита, очень просто. Например, северный полюс стрелки компаса — это тот, который указывает на север. Но, конечно же, это снова локальная особенность, связанная с земной географией; это то же самое, что говорить о том, в какой стороне находится Чикаго, так что это не годится. Если вы видели стрелку компаса, то могли заметить, что ее конец, указывающий на север, имеет голубоватый оттенок. Но этим мы обязаны тому человеку, который эту стрелку покрасил. Это всё — локальные, условные критерии.

Однако если бы магнит обладал тем свойством, что при внимательном рассмотрении можно было бы заметить волоски, растущие на его северном полюсе и отсутствующие на южном и это было бы общим правилом, т. е. если бы существовал какой-нибудь единый способ отличить северный полюс магнита от южного, то *это было бы концом закона симметрии отражения*.

Чтобы еще яснее проиллюстрировать всю проблему, представим, что мы разговариваем по телефону с марсианином, или с кем-то очень далеким. Мы не имеем возможности послать ему какой-либо вещественный образец; вот если бы мы могли послать свет, то послали бы ему поляризованный вправо свет и сказали бы: «Это правосторонний свет — просто посмотри, в какую сторону он вращается». Но мы не можем *послать* ему ничего подобного, мы можем лишь разговаривать с ним. Он далеко или находится в каком-то непонятном месте, и не может видеть того, что видим мы. Мы, например, не можем сказать ему: «Взгляни на Большую Медведицу и посмотри, как там расположены звезды. То, что мы называем «правое» — это...». Мы можем только говорить с ним по телефону.

Теперь мы хотим сообщить ему всё о себе. Конечно, сначала лучше всего начать с чисел: «Тик, тик, *два*, тик, тик, тик, *три*, ...», так что постепенно он начнет понимать некоторые слова, и так далее. Через некоторое время мы, возможно, сблизимся с этим парнем, и он скажет: «А как, вы, ребята, выглядите?» Мы начнем описывать себя и скажем: «Мой рост метр восемьдесят».

Он скажет: «Подождите, а что такое метр?» Можно ли объяснить ему, что такое метр? Конечно! Мы говорим: «Тебе известен диаметр атома водорода — мой рост 17 000 000 000 атомов водорода!» Это возможно, потому что физические законы не изменяются с изменением масштаба, и потому мы *можем* определить абсолютную длину. И вот мы определили размер нашего тела; можно описать ему его общую форму — оно имеет отростки с пятью шишками на концах — и при этом не сталкиваемся с особыми трудностями. Он даже сможет постепенно начать составлять нашу модель. Он скажет: «О, вы вполне симпатичные ребята; а что у вас внутри?» И мы начнем описывать разные внутренние органы, дойдем до сердца, тщательно опишем его форму и скажем: «Теперь помести сердце с левой стороны». Он скажет: «Что это — левая сторона?» И теперь наша проблема — описать, с какой стороны находится наше сердце, если он не видит то, что видим мы, и никогда не получал от нас ничего, что позволило бы ему понять, где же левая сторона. Можем ли мы сделать это?

2.7. Четность не сохраняется!

Оказывается, что законы тяготения, законы электричества, магнетизма и ядерных сил — все они подчиняются принципу симметрии при отражении, так что эти законы, как и всё производное от них, нам не помогут. Но в природе существует явление, происходящее со многими частицами, называемое *бета-распадом*, или *слабым распадом*. Один из примеров слабого распада, связанный с частицей, открытой в 1954 году, задал физикам трудную задачу. Существует некоторая частица, которая распадается на три π -мезона, как показано на рис. 2.5. Эту частицу сначала называли τ -мезон. На рис. 2.5 показана также другая частица, которая распадается на два π -мезона; один из них по закону сохранения заряда должен быть нейтральным. Эту частицу называли θ -мезон. Итак, мы имеем частицу, названную

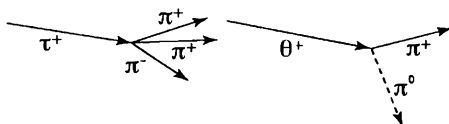


Рис. 2.5. Схематические диаграммы распадов τ^+ - и θ^+ -мезона

τ -мезон и распадающуюся на три π -мезона, и частицу θ -мезон, которая распадается на два π -мезона. Вскоре было обнаружено, что τ и θ почти равны по массе; точнее, они были равны в пределах ошибки эксперимента. Далее оказалось, что время, за которое происходит распад соответственно на три и два π -мезона, почти в точности совпадает: длительность жизни обеих частиц одинакова. Далее, всюду, где эти частицы появлялись, они находились в одном и том же соотношении, скажем, 14% τ на 86% θ .

Любой человек подogaдливее сразу же понимает, что это должна быть одна и та же частица, которая имеет два способа распада, а вовсе не две разных частицы. Поэтому мы получили постоянный процент рождения (просто отражающий способы, которыми она распадается).

Однако можно доказать (и здесь мы не можем объяснить, как именно), исходя из принципа симметрии при отражении в квантовой механике, что одна и та же частица *не может* распадаться двумя различными способами. Закон сохранения, соответствующий принципу симметрии при отражении, не имеет классического аналога, и в квантовой механике он был назван *сохранением четности*. Из принципа сохранения четности, или, точнее, из симметрии уравнений квантовой механики, описывающих слабый распад при отражении, следовало, что одна и та же частица не может иметь два вида распада, так что это должно быть просто совпадение масс, времен жизни и так далее. Но чем больше исследовалась частица, тем более удивительным становились эти совпадения, и постепенно стало расти подозрение, что, возможно, фундаментальный закон природы о симметрии отражения может оказаться неверным.

Как результат этой очевидной неудачи, физики Ли и Янг предложили провести другие эксперименты, касающиеся распада, чтобы проверить, выполняется ли закон в других случаях. Первый такой эксперимент был выполнен мисс Ву в Колумбийском университете, и заключался он в следующем. При использовании очень сильного магнита при очень низкой температуре обнаружилось, что определенный изотоп кобальта, обладающий магнитными свойствами, распадается с испусканием электрона, и если температура настолько низкая, что тепловые колебания не слишком сильно влияют на атомные магнетики, то все они выстраиваются в линию в магнитном поле. Итак, в сильном

магнитном поле все атомы кобальта выстраиваются в линию. Затем они распадаются, испуская электроны, и оказалось, что, когда это происходит в поле, вектор $\mathbf{B}$ которого направлен вверх, большинство электронов испускается вниз.

Для человека, далекого от мира физики, такое замечание не представляется чем-либо значительным, но для того, кто понимает проблему и интересуется строением нашего мира, это — открытие нашего времени. Если мы помещаем атомы кобальта в чрезвычайно сильное магнитное поле, то большее число вылетевших электронов испускается вниз, чем вверх. Поэтому, если бы мы провели этот эксперимент в «зеркале» так, чтобы атомы кобальта выстроились бы в противоположном направлении, они испускали бы электроны *вверх*, а не *вниз*; это явление *несимметрично*. *На полюсе выросли волосы!* Южный полюс магнита таков, что электроны при β -распаде имеют тенденцию двигаться от него; это отличает физически северный полюс от южного.

После этого было проведено множество других экспериментов: распад π -мезона на μ и ν ; распад μ -мезона на электрон и два нейтрино; распад Λ -частицы на протон и π -мезон; распад Σ -частицы, и много других распадов. Почти во всех случаях, где это могло ожидаться, обнаружилось, что явления *не* подчиняются симметрии при отражении! Фундаментально закон физики — закон симметрии при отражении — неверен на этом уровне.

Короче говоря, теперь мы можем сообщить марсианину, где у нас расположено сердце. Мы скажем: «Слушай, сделай себе магнит, обмотай его проволокой, пропусти по ней ток, а затем возьми кусок кобальта и охлади его до низкой температуры. Организуй эксперимент таким образом, чтобы испущенные электроны двигались от ног к голове, тогда направление, в котором ток движется через провод — это направление справа налево». Так что теперь можно с помощью подобного эксперимента определить правое и левое.

Было предсказано много других свойств. Например, оказалось, что спин, или момент количества движения, ядра кобальта до распада равен $5\hbar$, а после распада $4\hbar$. Электрон уносит часть спина, кроме того, в процессе участвует нейтрино. Отсюда легко видеть, что спин, уносимый электроном, должен быть направлен вдоль направления его движения, то же верно и для нейтрино. Все выглядит так, как будто электрон закручивается влево, и это тоже было проверено. Здесь, в КАЛТЕХ'е, Бём и Уопстра установили, что электроны действительно закручены

влево. (Были эксперименты с противоположным результатом, но они оказались ошибочными.)

Следующей задачей было нахождение закономерности, с которой происходит нарушение закона сохранения четности. Есть ли правило, которое указывало бы нам, насколько сильным должно быть это нарушение? А правило таково: нарушение происходит только в очень медленных реакциях, называемых слабыми распадами, и если это происходит, то частицы, уносящие спин, — электрон или нейтрино и так далее — испускаются в основном вращаясь влево. Это правило связывает полярный вектор скорости с аксиальным вектором момента количества движения и утверждает, что направление момента количества движения скорее противоположно направлению вектора скорости, чем совпадает с ним.

Теперь у нас есть правило, но и сегодня мы не понимаем многих «отчего» и «почему». Почему это правило справедливо, какой фундаментальный смысл скрывается за ним, и как оно связано со всем остальным? В том момент мы были так потрясены самим фактом несимметричности, что были не в силах прийти в себя и понять, как это отразится на всех остальных правилах. Однако проблема эта интересна, современна и все еще не решена, поэтому вполне уместно обсудить некоторые вопросы, связанные с ней.

2.8. Антивещество

Первое, что следует сделать, когда потеряна одна из симметрий, — это немедленно вернуться к списку известных или предполагаемых симметрий и задать вопрос, не потеряны ли еще какие-нибудь. Мы не упоминали еще одну операцию из нашего списка, вопрос о которой должен неизбежно возникнуть, — отношение между веществом и антивеществом. Дирак предсказал, что в дополнение к электронам должна существовать еще одна частица, названная позитроном (открытая в КАЛТЕХ'е Андерсоном), которая связана с электроном. Все свойства этих двух частиц подчиняются определенным правилам соответствия: энергии их равны, массы равны, заряды противоположны, но самое важное, когда эти частицы сталкиваются, они могут уничтожить друг друга (аннигилировать), превратив всю свою массу в энергию, скажем, γ -лучей. Позитрон называют античастицей по отношению к электрону, и перечисленные свойства яв-

ляются характеристиками частицы и ее античастицы. Это было ясно из утверждения Дирака, что все остальные частицы в мире тоже должны иметь соответствующие античастицы. Например, для протона должен существовать антипротон, который теперь обозначается через $\bar{p}$. У антипротона должен быть отрицательный заряд и такая же масса, как у протона, и т. д. Наиболее важным свойством является то, что при столкновении протон и антипротон могут уничтожить друг друга. Мы делаем на этом акцент по той причине, что люди не понимают, когда мы говорим, что существуют нейтрон и антинейтрон. Они говорят: «Нейтрон нейтрален, как же может существовать заряд, противоположный ему?» Приставка «анти» означает не просто противоположный заряд, она учитывает определенный набор свойств, значительная часть которых носит противоположный характер. Антинейтрон отличается от нейтрона следующим образом: столкнем два нейтрона, они так и останутся двумя нейтронами, но если мы столкнем нейтрон с антинейтроном, они уничтожат друг друга со взрывом высвобожденной энергии в виде разных p -мезонов, γ -квантов и всякой всячины.

Теперь, когда мы имеем антинейтроны, антипротоны и антиэлектроны, мы в принципе можем составить антиатом. Они еще не созданы, но в принципе это возможно. Например, атом водорода имеет в центре протон, вокруг которого вращается электрон. Представим, что мы смогли создать где-то антипротон с вращающимся вокруг позитроном, будет ли он вращаться? Ну, прежде всего, антипротон электрически отрицателен, а позитрон положителен, так что они притягивают друг друга с соответствующей силой, а поскольку массы у них одинаковы с протоном и электроном, то одинаковым будет и всё остальное. Один из принципов симметрии в физике таков, как показывают уравнения, что если, например, часы были сделаны из вещества, а потом мы делаем такие же часы из антивещества, то они будут идти абсолютно одинаково. (Разумеется, если мы сблизим одни часы с другими, они уничтожат друг друга, но это уже другое дело.)

Немедленно возникает вопрос: мы можем сделать из вещества двое часов, одни из которых «левосторонние», а другие «правосторонние». Мы можем сделать не простые часы, а такие, которые содержат кобальт, магниты и детекторы электронов, которые определяют присутствие электронов β -распада и подсчитывают их. Каждый раз, когда регистрируется электрон,

секундная стрелка передвигается на одно деление вперед. Тогда зеркально отраженные часы, получая меньшее число электронов, не будут идти с той же скоростью. Так что мы, очевидно, можем сделать двое часов таким образом, что левосторонние не будут согласовываться с правосторонними. Давайте сделаем из вещества часы, которые назовем стандартными правосторонними часами. Теперь давайте сделаем, также из вещества, часы, которые назовем левосторонними. Мы только что установили, что обычно они ведут себя *не* одинаково; до того знаменитого открытия считали, что они будут вести себя одинаково. Теперь предположим также, что вещество и антивещество эквивалентны. То есть, если мы сделаем из антивещества точно такие же правосторонние часы, они будут вести себя как правосторонние часы из вещества, то же самое относится к левосторонним часам. Другими словами, вначале полагали, что все четверо часов будут вести себя одинаково; теперь мы, конечно, знаем, правосторонние и левосторонние часы из вещества — не одно и то же. Следовательно, можно предположить, что правосторонние и левосторонние часы из антивещества — также не одно и то же.

Возникает очевидный вопрос: есть ли пара часов, которые идут одинаково? Другими словами, ведет ли себя правостороннее вещество так же, как правостороннее антивещество? Или же правостороннее вещество ведет себя так же, как левостороннее антивещество? Эксперименты с β -распадом, но позитронным распадом вместо электронного, указывают, что такая связь имеется: «правое» вещество ведет себя так же, как «левое» антивещество.

Значит, в конце концов право-левая симметрия все таки выдерживается! Если мы создадим левосторонние часы, но сделаем их из другого вида вещества — антивещества, они будут идти точно так же. Следовательно, получилось так, что вместо двух независимых правил в нашем списке симметрий, мы получили одно новое комбинированное правило, утверждающее, что «правостороннее» вещество симметрично «левостороннему» антивеществу.

Так что, если наш марсианин сделан из антивещества, и мы дадим ему указания, как сделать «правостороннюю» модель нашего тела, он, конечно, поступит наоборот. Что может случиться потом, после долгих переговоров, когда мы научим друг друга строить космические корабли и, наконец, встретимся в космосе на полпути между нами? Мы уже успели изучить обы-

чай и привычки друг друга, и вот мы спешим навстречу, протягивая руку для рукопожатия. И если он протянул вам левую руку — берегитесь!

2.9. Нарушенная симметрия

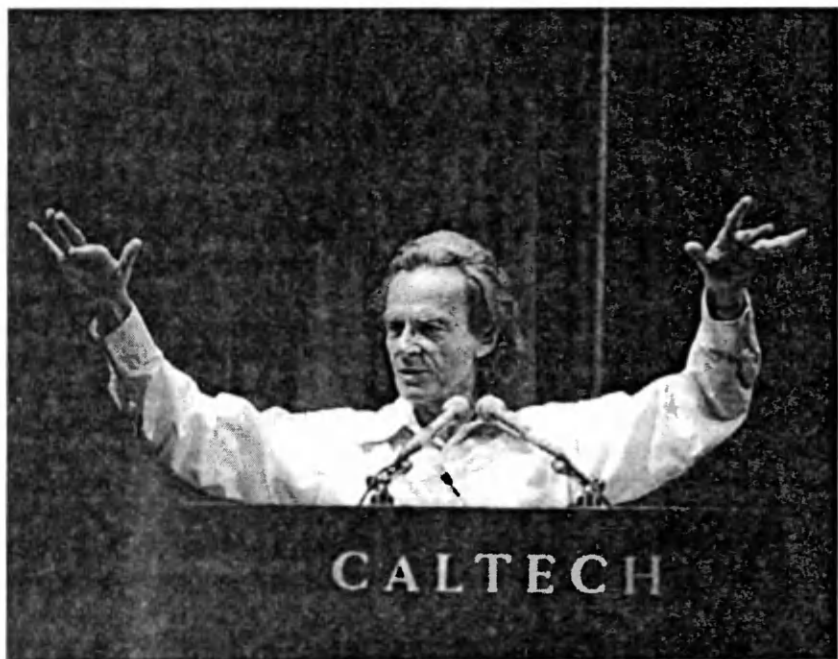
Следующий вопрос таков: как мы можем использовать законы, которые *почти* симметричны? Замечательно, что для широкого диапазона важнейших явлений — ядерных сил, электрических явлений и даже для некоторых слабых, вроде гравитации — все законы симметричны. С другой стороны, всплывает одно маленькое слабенькое явление и говорит: «Нет, не все законы симметричны!» Может ли быть так, чтобы природа была почти симметрична, а не абсолютно симметрична? Что нам делать с этим? Во-первых, есть ли у нас другие примеры подобного рода? Ответ — да, у нас действительно есть несколько других примеров. Например, ядерные части сил между протоном и протоном, между нейтроном и нейтроном и между протоном и нейтроном в точности равны друг другу. Это — новая симметрия, симметрия ядерных сил, вследствие которой мы можем взаимно заменять протоны и нейтроны, но, очевидно, это неполная симметрия, поскольку электрическая сила отталкивания протонов отсутствует для нейтронов. Поэтому мы не *всегда* можем заменять протон на нейтрон, хотя такая замена может служить хорошим приближением. Почему *хорошим*? Потому что ядерные силы гораздо сильнее электрических. Следовательно, это тоже «почти» симметрия, и это еще один пример такой ситуации.

В своем сознании мы склонны воспринимать симметрию как в некотором роде совершенство. На самом деле это очень похоже на мысль греков, что окружность совершенна. Им трудно было поверить, что орбиты планет не круги, а только близки к кругам. Но различие между кругом и почти кругом вовсе не маленькое, это просто огромное различие. Круг обладает совершенством и симметрией, которые исчезают при малейшем ее искажении — симметрии больше нет. Тогда возникает вопрос: почему орбиты *почти* круги — и это гораздо более трудный вопрос. В действительности планеты, вообще говоря, должны двигаться по эллипсам, но на протяжении веков под действием приливных сил их орбиты стали почти симметричными. Вопрос теперь в том, не имеем ли мы здесь похожую проблему. Если бы

пути планет были действительно точными кругами, то здесь нечего объяснять, все просто и понятно. Но поскольку они всего лишь почти круговые, здесь требуется многое объяснить. В результате возникает серьезная задача из динамики, и для объяснения, почему орбиты почти симметричны, приходится рассматривать приливные силы и тому подобное.

Так что наша задача — объяснить, откуда возникает симметрия. Почему природа близка к симметрии, почти симметрична? Ни у кого нет объяснения. Мы можем лишь предложить вам старое японское предание. В японском городе Нейко есть ворота, которые японцы называют самыми красивыми воротами страны. Они были построены в те времена, когда Япония находилась под сильным влиянием китайского искусства. Ворота выполнены весьма искусно, с фронтонами и многочисленными колоннами; они покрыты красивой резьбой, с драконьими головами и принцами, вырезанными на колоннах, и тому подобным. Но если приглядеться к сложному узору, вырезанному на одной из колонн, можно увидеть, что один из элементов узора перевернут вверх ногами. Остальная часть узора полностью симметрична. Как гласит предание, это было сделано для того, чтобы боги не заподозрили человека в совершенстве. Так что в узор была намеренно внесена ошибка, чтобы боги не рассердились на людей.

Мы можем подхватить эту мысль и считать, что объяснение почти полной симметрии природы таково: Бог создал законы не совсем симметричными, чтобы мы не стали завидовать их совершенству!



3

Специальная теория относительности

3.1. Принцип относительности

Более 200 лет считалось, что уравнения движения, провозглашенные Ньютоном, правильно описывают природу, и когда впервые в этих законах была обнаружена ошибка, тогда же был найден и способ ее исправления. И ошибка и способ ее исправления были найдены Эйнштейном в 1905 году.

Второй закон Ньютона, который выражается уравнением

$$F = d(mv)/dt,$$

был сформулирован с молчаливым предположением, что m — величина постоянная. Но теперь мы знаем, что это не так и что масса тела возрастает с ростом скорости. В скорректированной Эйнштейном формуле m имеет вид

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (3.1)$$

где «масса покоя» m_0 — это масса неподвижного тела, а c — скорость света (равная примерно 3×10^5 км · с⁻¹).

Кому теория нужна лишь для решения задач, тому этой формулы будет достаточно. Больше ничего от теории относительности не понадобится — это всего лишь изменение законов Ньютона путем введения корректирующего множителя для массы. Из самой формулы легко видеть, что в обычных условиях рост массы незначителен. Даже для спутника, который вращается вокруг Земли со скоростью 8 км/с, $v/c = 2,67 \times 10^{-5}$; подстановка этого значения в формулу (3.1) показывает, что поправка к массе составляет только одну двухмиллиардную часть самой мас-

сы, что практически невозможно заметить. Однако поскольку этот эффект столь мал в обычных условиях, кажется удивительным, что теоретически он был открыт раньше, чем экспериментально. Эффект весьма значителен при наблюдении движения частиц, скорость которых приближалась к скорости света. Интересно посмотреть, как закон, учитывающий едва заметное изменение в некоторых цифрах (на тот момент, когда он был открыт), появился на свет в результате сочетания экспериментов и физических умозаключений. Вклад в это открытие внесли многие, но конечным итогом их работы стало открытие Эйнштейна. На самом деле существуют две теории относительности Эйнштейна. Эта глава посвящена специальной теории относительности, датированной 1905 годом. В 1915 году Эйнштейн выдвинул еще одну теорию, названную общей теорией относительности. Она обобщает специальную теорию на случай тяготения; здесь мы не будем обсуждать общую теорию.

Принцип относительности впервые был установлен Ньютоном в одном следствии из законов движения: «Движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения». Это означает, например, что в космическом корабле, движущемся с постоянной скоростью, все выполняемые эксперименты и все явления выглядят так же, как и в неподвижном корабле (при условии, конечно, что наблюдатель не находится снаружи). В этом смысл принципа относительности. Это достаточно простая мысль, и единственный вопрос состоит в том, *верно* ли, что во всех экспериментах, выполняемых внутри движущейся системы, законы физики будут проявляться так же, как и в случае неподвижной системы. Давайте посмотрим, так ли выглядят законы Ньютона в движущейся системе. Для этого нам снова потребуется помощь Джо и Мо.

Допустим, что Мо движется вдоль оси x с постоянной скоростью u и измеряет свое положение в некоторой точке, показанной на рис. 3.1. Он обозначает координату x этой точки в своей системе координат как x' . Джо неподвижен и измеряет положение той же точки, обозначая ее x -координату в своей системе как x . Связь между координатами в двух системах ясна из рисунка. Через время t начало координат Мо пройдет расстояние ut , и если в начальный момент обе системы совпадали, то

$$\begin{aligned}
 x' &= x - ut, \\
 y' &= y, \\
 z' &= z, \\
 t' &= t.
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Если мы подставим эти преобразования координат в законы Ньютона, то эти законы преобразуются в такие же законы, но для системы со штрихом; то есть законы Ньютона имеют одинаковый вид как в движущейся системе, так и в неподвижной, и, следовательно, невозможно с помощью механических экспериментов определить, движется система или нет.

Принцип относительности использовался в механике издавна. Он применялся разными людьми, в частности, Гюйгенсом для получения правил столкновения бильярдных шаров, практически в том же виде, в каком мы применяли его в главе 10* при обсуждении сохранения импульса. Интерес к нему повысился в прошлом столетии в результате исследований явлений электричества, магнетизма и света. Долгие и тщательные исследования этих явлений достигли высшей точки в уравнениях Максвелла для электромагнитного поля. Его уравнения сводят воедино электричество, магнетизм и свет. Однако уравнения Максвелла, по-видимому, не подчиняются принципу относительности. То есть, если мы преобразуем уравнения Максвелла с помощью подстановки (3.2), их вид не останется прежним; следовательно, в движущемся космическом корабле электрические и оптические явления будут происходить не так, как в неподвижном. Значит, их можно использовать для определения скорости корабля; можно будет определить абсолютную ско-

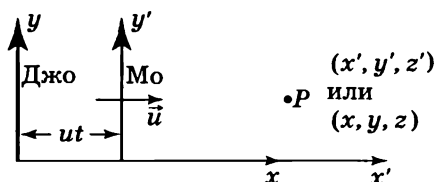


Рис. 3.1. Две координатные системы, находящиеся в равномерном относительном движении вдоль оси x

* в первоначальных «Лекциях по физике», том I.

рость корабля, проведя соответствующие оптические или электрические измерения. Одно из следствий уравнений Максвелла состоит в том, что если возмущение поля генерирует свет, то эти электромагнитные волны распространяются во всех направлениях одинаково и с одинаковой скоростью $c = 300\,000$ км/с. Другое следствие уравнений состоит в том, что, если источник возмущения движется, то испускаемый свет распространяется в пространстве с той же самой скоростью c . Это аналогично ситуации со звуком — скорость звуковых волн не зависит от движения его источника.

Эта независимость от движения источника ставит перед нами интересную задачу:

Предположим, мы движемся в автомобиле со скоростью u , а свет от задних фар распространяется со скоростью c . Дифференцирование первого из уравнений (3.2) дает

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - u.$$

Это означает, что согласно преобразованию Галилея видимая скорость света, как мы ее измеряем из автомобиля, равна не c , а $c - u$. Например, если автомобиль движется со скоростью 100000 км/с, а свет — со скоростью 300000 км/с, то свет относительно автомобиля будет двигаться со скоростью 200000 км/с. В любом случае, измерив скорость света, испускаемого фарами (если только преобразования Галилея справедливы для света), можно определить скорость автомобиля. На этом принципе было основано множество опытов по определению скорости Земли, но все они закончились неудачей — они указывали, что у Земли *вовсе нет скорости*. Мы скоро подробно обсудим один из таких опытов, чтобы показать, что в точности было сделано и в чем было дело. Что-то неладное творилось с уравнениями физики. Что же это могло быть?

3.2. Преобразование Лоренца

Когда обнаружили недостатки уравнений физики, первой мыслью было, что все дело в новых уравнениях электродинамики Максвелла, открытых всего за 20 лет до этого. Казалось почти очевидным, что эти уравнения ошибочны. Их принялись изменять, переписывать, подгонять таким образом, чтобы

принцип относительности удовлетворялся при преобразованиях Галилея. При этом в уравнениях электродинамики появились новые члены, которые предсказывали новые электрические явления, но их не удалось подтвердить экспериментально, поэтому от такой попытки отказались. Постепенно становилось ясно, что максвелловские законы электродинамики верны, и проблеме надо искать в другом месте.

Тем временем Лоренц заметил одно любопытное явление: когда он делал подстановку в уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},\end{aligned}\tag{3.3}$$

то форма уравнений Максвелла не менялась! Уравнения (3.3) известны как *преобразование Лоренца*. Эйнштейн, следуя мысли, высказанной Пуанкаре, предположил, что *все физические законы не должны меняться при преобразовании Лоренца*. Другими словами, мы должны изменить не законы электродинамики, а законы механики. Но как следует изменить законы Ньютона, чтобы они оставались неизменными при преобразовании Лоренца? Если поставлена такая цель, то остается переписать уравнения Ньютона так, чтобы удовлетворялись все поставленные условия. Оказалось, что единственное требование — это чтобы масса m в уравнениях Ньютона приобрела вид (3.1). После такого изменения законы Ньютона и законы электродинамики приходят в соответствие. И если теперь мы используем преобразование Лоренца при сравнении измерений Мо и Джо, мы не сможем определить, кто из них движется, потому что форма всех уравнений в обеих системах координат будет одинаковой!

Интересно обсудить, что означает эта замена старых преобразований координат и времени на новые, поскольку старые (Галилея) кажутся очевидными, а новые (Лоренца) выглядят странно. Мы хотели бы знать, возможно ли логически и экспе-

риментально, чтобы именно новые, а не старые преобразования оказались верными. Чтобы ответить на этот вопрос, недостаточно изучить законы механики, надо (как и сделал Эйнштейн) проанализировать наши представления о *пространстве и времени*, иначе этих преобразований не понять. Нам придется довольно подробно обсудить эти идеи и их значение для механики, поэтому заранее скажем, что эти усилия будут вознаграждены, так как результаты согласуются с экспериментом.

3.3. Опыт Майкельсона—Морли

Как уже упоминалось, в свое время были предприняты попытки определить абсолютную скорость Земли сквозь воображаемый «эфир», который, как тогда считалось, заполняет все пространство. Наиболее известным из этих опытов был опыт Майкельсона—Морли, выполненный в 1887 году. Отрицательные результаты этого опыта были окончательно объяснены Эйнштейном только через 18 лет.

Для опыта Майкельсона—Морли было использовано устройство, схема которого изображена на рис. 3.2. Это устройство включало в себя источник света A , полупрозрачную посеребренную стеклянную пластинку B и два зеркала, C и E ; пластинка и зеркала закреплены на жестком основании. Зеркала были расположены на равных расстояниях L от пластинки B . Пластинка B расщепляет падающий на нее пучок света на два, продолжающие двигаться по взаимно перпендикулярным направлениям к зеркалам, которые отражают их обратно на B . Пройдя снова сквозь пластинку B , эти пучки D и F накладываются друг на друга. Если время прохождения света от B до E и обратно равно времени прохождения от B до C и обратно, то отраженные пучки D и F окажутся в фазе и взаимно усилятся, но если времена слегка различаются, то возникнет небольшой сдвиг по фазе, и будет наблюдаться интерференция. Если устройство «покоится» в эфире, то времена будут в точности равны, но если оно движется направо со скоростью u , то времена должны различаться. Давайте посмотрим, почему.

Сначала подсчитаем время прохождения света от B к E и обратно. Пусть t_1 — время движения света «туда», а t_2 — время движения «обратно». Пока свет движется от пластинки к зеркалу, наше устройство пройдет путь ut_1 , поэтому свет, двигаясь со

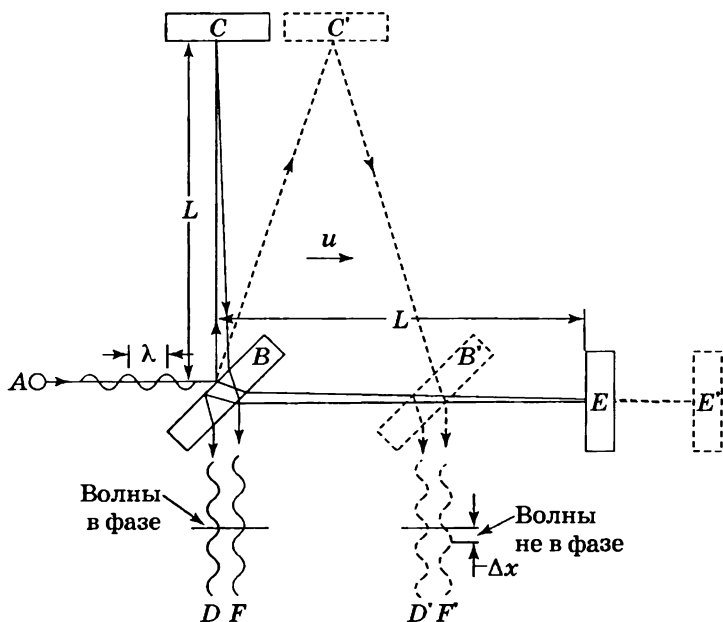


Рис. 3.2. Схема опыта Майкельсона—Морли

скоростью c , пройдет расстояние $L + ut_1$. Мы можем поэтому обозначить это расстояние как ct_1 , так что имеем

$$ct_1 = L + ut_1, \quad \text{или} \quad t_1 = L/(c - u).$$

(Этот результат очевиден также, если учесть, что скорость света относительно устройства равна $c - u$, поэтому время равно длине L , деленной на $c - u$.) Точно также можно подсчитать время t_2 . За это время пластинка B приблизится на расстояние ut_2 , поэтому на обратном пути свет пройдет путь $L - ut_2$. Тогда имеем

$$ct_2 = L - ut_2, \quad \text{или} \quad t_2 = L/(c + u).$$

Тогда общее время

$$t_1 + t_2 = 2Lc/(c^2 - u^2)$$

удобнее записать в виде

$$t_1 + t_2 = \frac{2L/c}{1 - u^2/c^2}. \quad (3.4)$$

Теперь вычислим время t_3 движения света от пластинки B до зеркала C . Как и прежде, за время t_3 зеркало C пройдет направо путь ut_3 и перейдет в точку C' , за то же самое время свет пройдет путь ct_3 вдоль гипотенузы треугольника BC' . Для этой гипотенузы имеем

$$(ct_3)^2 = L^2 + (ut_3)^2$$

или

$$L^2 = c^2 t_3^2 - u^2 t_3^2 = (c^2 - u^2) t_3^2,$$

откуда получим

$$t_3 = L / \sqrt{c^2 - u^2}.$$

При обратном движении свет проходит тот же путь, что можно видеть из симметрии рисунка, поэтому общее время равно $2t_3$. После небольшого преобразования формы мы можем написать

$$2t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (3.5)$$

Теперь мы можем сравнить времена, затраченные на движение двумя пучками света. В выражениях (3.4) и (3.5) числители совпадают — это время распространения света в покоящемся приборе. Член u^2/c^2 в знаменателе будет очень мал, за исключением тех случаев, когда скорость u сравнима со скоростью c . Знаменатели определяют изменение времени из-за движения устройства. Обратите внимание: эти изменения *не одинаковы* — время движения до точки C и обратно немного меньше, чем время движения до точки E и обратно, несмотря на то, что зеркала установлены на равном расстоянии от B . Остается только точно измерить эту разницу.

Здесь возникает одна техническая тонкость — предположим, что оба расстояния L не точно равны друг другу. Действительно, мы не можем сделать их абсолютно равными. В таком случае мы просто поворачиваем все устройство на 90 градусов, так что теперь прямая BC направлена вдоль движения, а BE — перпендикулярно движению. Тогда различие в расстояниях становится несущественным, и остается только наблюдать *смещение* интерференционных полос, происходящее при повороте аппарата.

Выполняя свой опыт, Майкельсон и Морли так расположили свое устройство, что отрезок BE был параллельным скорости Земли при ее движении по орбите (в определенный час дня и ночи). Эта орбитальная скорость составляет около 30 км/с, и любое «перемещение эфира» должно было иметь по крайней мере такую же величину в определенные часы дня или ночи и в определенное время года. Устройство было достаточно чувствительным, чтобы обнаружить такое явление, но никакой разницы во времени обнаружено не было — скорость Земли сквозь эфир обнаружить не удалось. Результат опыта оказался нулевым.

Это было загадочно и тревожно. Первую плодотворную идею, как выйти из создавшегося тупика, выдвинул Лоренц. Он предположил, что все материальные тела при движении сжимаются и это происходит только в направлении движения. Если длина покоящегося тела равна L_0 , то при движении со скоростью u в направлении, параллельном длине, новая длина, которую мы назовем $L_{\parallel}$ (L параллельное), определяется выражением

$$L_{\parallel} = L_0 \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (3.6)$$

Если эту формулу применить к устройству Майкельсона—Морли, то расстояние от B до C не изменится, но расстояние от B до E уменьшится до значения $L\sqrt{1 - u^2/c^2}$. Поэтому выражение (3.5) не изменится, а в (3.4) следует заменить L в соответствии с (3.6). После этого получим

$$t_1 + t_2 = \frac{(2L/c)\sqrt{1 - u^2/c^2}}{1 - u^2/c^2} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (3.7)$$

Сравнивая этот результат с (3.5), мы видим, что $t_1 + t_2 = 2t_3$. Следовательно, если наше устройство сжимается указанным образом, можно понять, почему опыт Майкельсона—Морли не дал результата. Хотя гипотеза о сокращении успешно объясняла отрицательный результат опыта, существовало мнение, что она была придумана специально для объяснения затруднения. Она была слишком искусственной. Однако во многих других экспериментах, имевших целью обнаружить эфирный ветер, возникали аналогичные трудности, пока не возникло впечатление, что силы природы устроили «тайный заговор» против человека:

как только ему кажется, что он нашел явление, которое позволит определить скорость u , они тут же демонстрируют ему новое явление, разрушающее такую возможность.

В конце концов было признано (на это указал Пуанкаре), что *полный тайный заговор сам по себе является законом природы!* Пуанкаре предположил, что в природе *существует* закон о том, что эфирный ветер нельзя обнаружить *никаким* способом; то есть не существует способа определить абсолютную скорость.

3.4. Преобразование времени

При проверке, согласуется ли идея о сокращении расстояний с результатами других экспериментов, оказалось, что все согласуется при условии, что *время* тоже преобразуется в соответствии с четвертым уравнением системы (3.3). Это происходит потому, что время t_3 движения пучка света от точки B к точке C , вычисленное человеком на борту движущегося космического корабля, не совпадает с временем, вычисленным неподвижным наблюдателем. Для человека в корабле это время равно $2L/c$, а для неподвижного наблюдателя оно равно $(2L/c)\sqrt{1 - u^2/c^2}$ (3.5).

Другими словами, если вы со стороны наблюдаете, как человек в космическом корабле зажигает сигару, все действия последнего кажутся вам замедленными, хотя для человека внутри все происходит в нормальном темпе. Так что должно происходить не только сокращение длин, но и приборы для измерения времени («часы») должны работать медленнее. То есть, когда часы в космическом корабле показывают, что прошла 1 секунда, часы внешнего наблюдателя показывают, что прошло $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ секунды.

Это отставание часов в движущейся системе является весьма своеобразным явлением, достойным объяснения. Чтобы понять его, мы должны рассмотреть работу часов и посмотреть, что при этом происходит. Так как это довольно сложно, рассмотрим очень простые часы. Это часы несколько странного вида, но в принципе они будут работать: это стержень (метровой длины) с зеркалами на обоих концах. Если запустить луч света, он будет бегать вверх и вниз, и при попадании на нижнее зеркало часы будут тикать. Мы изготавливаем двое таких часов, с абсолютно одинаковой длиной стержня, и синхронизируем их, за-

пустив в одно и то же время; после этого часы идут одинаково, так как длины стержней одинаковы, и свет движется с постоянной скоростью c . Мы даем одни из этих часов человеку в космическом корабле, и он устанавливает стержень перпендикулярно направлению движения корабля; тогда длина стержня не изменится. Но откуда мы знаем, что длина, перпендикулярная движению, не меняется? Оба человека договариваются, что на высоте y в тот момент, когда стержни поровняются, каждый сделает отметку другому на его стержне. Согласно симметрии, эти отметки придутся на одинаковые координаты y и y' , иначе при сравнении результатов одна из отметок будет выше или ниже другой, и, следовательно, мы могли бы указать, кто из них в действительности двигался.

Давайте теперь посмотрим, что происходит с движущимися часами. Прежде чем человек взял их на борт, он убедился, что это хорошие, стандартные часы, и когда он взял их с собой в полет, то не заметил ничего необычного. А если бы он заметил, то понял бы, что он движется — если хоть что-нибудь вообще меняется в результате движения, то ясно, что он движется. Но принцип относительности говорит, что это невозможно в равномерно движущейся системе, следовательно, ничего в часах не произошло. С другой стороны, когда внешний наблюдатель смотрит на пролетающие мимо часы, он видит, что свет в своем движении от зеркала к зеркалу описывает зигзагообразную кривую, поскольку стержень все время смещается боком. Мы уже анализировали такое зигзагообразное движение в связи с опытом Майкельсона—Морли. Если за некоторое время стержень сместится на расстояние, пропорциональное u (рис. 3.3), то свет за это же время проделает путь, пропорциональный c , и поэтому расстояние по вертикали пропорционально $\sqrt{c^2 - u^2}$.

То есть свету потребуется *большее время*, чтобы пролететь от одного конца стержня до другого в движущихся часах, чем в неподвижных. Поэтому кажущееся время между двумя тиканиями часов больше для движущихся часов и пропорционально гипотенузе прямоугольного треугольника (что и является причиной появления квадратного корня в формуле). Из рисунка ясно также, что, чем больше u , тем сильнее видимое замедление часов. И это касается не только часов подобного типа, но (если теория относительности верна) любые другие часы, независимо от принципа их работы, также должны отставать, и в

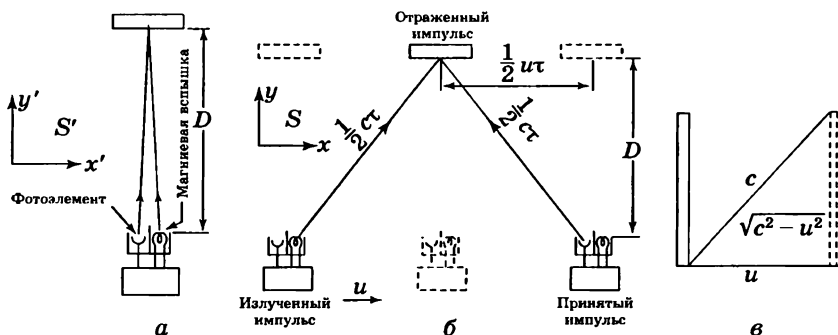


Рис. 3.3. Опыт со «световыми часами». а) «Световые часы» покоятся в системе S' , б) те же часы движутся в системе S , в) диагональ, по которой движется пучок света

той же самой пропорции — мы можем утверждать это без дополнительного анализа. Почему это происходит?

Чтобы ответить на этот вопрос, предположим, что у нас имеются еще двое часов, изготовленных в точности одинаково с колесиками и шестеренками, или основанных на радиоактивном распаде, или как-нибудь иначе. Тогда мы подстраиваем эти часы, чтобы они шли абсолютно синхронно с первой парой часов. Когда свет в первых часах проходит путь вверх и вниз и возвещает о своем прибытии щелчком, новые модели тоже завершают некоторый цикл, о чем они одновременно сообщают вспышкой, звонком или другим сигналом. Одни из этих часов отправляются на борт корабля вместе с часами первого типа. Возможно, *эти* часы не будут отставать, а будут продолжать идти так же, как их неподвижный двойник, и их показания разойдутся с другими движущимися часами. Но нет, если бы такое произошло, человек в корабле мог бы воспользоваться этим расхождением, чтобы определить скорость корабля. А ведь считается, что скорость узнать невозможно. *Нам нет необходимости знать механизм действия* новых часов, не нужно знать, что именно в них замедляется — мы просто знаем, что какова бы ни была причина, эти часы будут казаться отстающими, как и первые.

Значит, если *все* движущиеся часы замедляют ход, если никакая попытка измерить время не дает ничего, кроме замедления хода часов, тогда мы должны сказать, что, в определенном смысле, *само время* кажется замедляющимся на космическом

корабле. Все явления здесь — пульс человека, его мыслительные процессы, время, затрачиваемое им на зажигание сигары, время, чтобы вырасти и состариться, — все это будет замедляться в той же пропорции, потому что он не может определить, что находится в движении. Биологи и медики иногда заявляют, что у них нет полной уверенности в том, что для развития раковой опухоли в космическом корабле потребуется больше времени, но современные физики со своей точки зрения почти уверены в этом; иначе по скорости развития опухоли можно было бы определять скорость корабля!

Очень интересный пример замедления времени при движении дают мю-мезоны (мюоны) — частицы, которые самопроизвольно распадаются в среднем через $2,2 \times 10^{-6}$ с. Они попадают на Землю с космическими лучами, но могут быть и искусственно созданы в лаборатории. Часть космических мюонов распадается еще на большой высоте, а оставшиеся — только после того, как остановятся в веществе. Ясно, что при таком коротком времени жизни мюон не может пролететь даже со скоростью света больше 600 метров. Но хотя мюоны возникают в верхних слоях атмосферы (некоторые на высотах около 10 километров), их обнаруживают внизу, в лабораториях, в космических лучах. Как такое возможно? Ответ заключается в том, что разные мюоны движутся с разными скоростями, и некоторые — со скоростями, близкими к скорости света. В то время как с их собственной точки зрения они живут всего лишь около 2 микросекунд, с нашей точки зрения они живут значительно дольше — достаточно долго, чтобы успеть достичь Земли. Их жизнь удлинится в $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ раз. Среднее время жизни мюонов разных скоростей было достаточно точно определено, причем полученные значения хорошо согласуются с формулой.

Мы не знаем, почему распадается мезон и в чем состоит механизм распада, но мы знаем, что его поведение соответствует принципу относительности. В этом заключена полезность принципа относительности — он позволяет нам делать предсказания даже о таких вещах, о которых другим путем мы мало что узнаем. Например, еще не имея никакого представления о причинах распада мезона, мы, тем не менее, можем предсказать, что при движении со скоростью, равной $9/10$ скорости света, кажущаяся продолжительность его жизни равна $(2,2 \times 10^{-6}) / \sqrt{1 - 9^2/10^2}$ секунд; и наше предсказание работает.

3.5. Лоренцево сокращение

Теперь давайте вернемся к преобразованию Лоренца и попытаемся получше понять связь между системами координат (x, y, z, t) и (x', y', z', t') , которые мы будем называть системами S и S' , или, соответственно, системами Джо и Мо. Мы уже отмечали, что первое уравнение основано на предположении Лоренца о том, что по направлению x все тела сжимаются. Как же мы сможем доказать, что сокращение действительно имеет место? Мы уже поняли, что в опыте Майкельсона—Морли *поперечное* плечо BC не может изменять длину согласно принципу относительности; однако из нулевого результата опыта следует, что *времена* должны быть равны. Значит, чтобы опыт дал нулевой результат, *продольное* плечо BE должно быть короче в $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ раз. Что означает это сокращение в терминах измерений, проводимых Джо и Мо? Предположим, что Мо, двигаясь вместе с системой S' в направлении x , измеряет координату x' некоторой точки метровой линейкой. Он прикладывает линейку x' раз и считает, что измеренное расстояние равно x' метров. Однако с точки зрения Джо (в системе S), Мо использует укороченную линейку, так что «на самом деле» измеренное расстояние равно $x'\sqrt{1 - u^2/c^2}$ метров. Тогда, если система S' удалилась на расстояние ut от системы S , то наблюдатель из системы S скажет, что та же самая точка (в его координатах) находится на расстоянии $x = x'\sqrt{1 - u^2/c^2}$, или

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

Это и есть первое уравнение из преобразования Лоренца.

3.6. Одновременность

Аналогичным образом из-за различия в масштабах времени выражение в знаменателе входит в четвертое уравнение преобразования Лоренца. Наиболее интересный член в этом уравнении — выражение ux/c^2 в числителе, это выражение является новым и неожиданным. В чем его смысл? Если мы внимательно

присмотримся к ситуации, то увидим, что события, которые Мо из системы S' видит происходящими в различных местах одновременно, с точки зрения Джо, находящегося в системе S , происходят *не* одновременно. Если одно событие происходит в точке x_1 в момент t_0 , а другое событие — в точке x_2 и момент t_0 (в тот же самый), то два соответствующих момента времени t'_1 и t'_2 различаются на величину

$$t'_1 - t'_2 = \frac{u(x_1 - x_2)/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

Это явление называют «нарушением одновременности удаленных событий», и, чтобы несколько прояснить эту мысль, давайте рассмотрим следующий эксперимент.

Предположим, что человек, движущийся в космическом корабле (система S'), поместил часы в двух концах корабля и хочет знать, одинаково ли они идут. Как можно синхронизировать ход часов? Есть много способов. Один способ, почти не требующий вычислений, состоит в том, что сначала необходимо расположиться точно посередине между часами. Затем из этой точки мы посылаем световые сигналы, которые будут двигаться в обе стороны с одинаковой скоростью и, очевидно, достигнут обоих часов в одно и то же время. Это одновременное прибытие сигнала можно использовать для синхронизации часов. Предположим, что человек в системе S' синхронизировал свои часы именно этим способом. Давайте посмотрим, согласится ли наблюдатель в системе S , что эти часы идут одинаково. Космонавт в системе S' имеет право полагать, что это так, поскольку он не знает, что он движется. Но наблюдатель в системе S считает, что, поскольку корабль движется вперед, часы в передней части корабля убегают от светового сигнала, и свету потребуется пролететь больше половины длины корабля, чтобы догнать их; а часы в задней части движутся навстречу световому сигналу, и здесь дистанция оказывается короче. Поэтому сигнал достигнет задних часов раньше, хотя космонавту в системе S' кажется, что сигналы приходят одновременно. Таким образом, мы видим, что когда человек в космическом корабле считает события, происходящие в двух местах корабля, одновременными, то в другой системе координат одинаковым значениям t' в его системе координат соответствуют различные значения t !

3.7. 4-векторы

Посмотрим, что еще мы сможем обнаружить в преобразовании Лоренца. Интересно заметить, что преобразования переменных x и t по форме аналогичны преобразованиям переменных x и y , которые мы изучали в главе 1, когда говорили о вращении системы координат. Тогда мы имели

$$\begin{aligned}x' &= x \cos\theta + y \sin\theta, \\y' &= y \cos\theta - x \sin\theta,\end{aligned}\tag{3.8}$$

где новое значение x' (также как новое значение y') получается смешиванием старых значений x и y . В преобразовании Лоренца мы находим, что новое значение x' получается смешиванием x и t , а новое значение t' — смешиванием t и x . Значит, преобразование Лоренца похоже на вращение, только это — «вращение» в *пространстве и времени*. Это весьма странное понятие. Проверку этой аналогии с вращением можно провести, вычислив величину

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.\tag{3.9}$$

Первые три члена в левой и правой части этого уравнения представляют собой в трехмерной геометрии квадрат расстояния между точкой и началом координат (сферу). Он не меняется (остается инвариантным) при произвольном вращении осей координат. Подобно этому, уравнение (3.9) показывает, что существует определенная комбинация координат и времени, являющаяся инвариантной при преобразовании Лоренца. Таким образом, получается полная аналогия с вращением, благодаря чему векторы, т. е. величины, составленные из «компонентов», которые преобразуются таким же способом, как координаты и время, оказываются полезными и в теории относительности.

Таким образом, мы расширяем понятие вектора. До сих пор он имел только пространственные компоненты. Теперь добавим временной компонент. То есть, мы ожидаем, что будут существовать векторы с четырьмя компонентами, три из которых аналогичны компонентам обычного вектора, и с ними будет связан четвертый компонент — аналог времени.

Это понятие будет проанализировано в следующих главах, где мы обнаружим, что, если применить идеи из этого раздела к

импульсу, это даст три пространственные составляющие, подобные обычным компонентам импульса, и четвертую составляющую, временную (которая представляет *энергию*).

3.8. Релятивистская динамика

Теперь мы готовы к более широкому исследованию того, какую форму принимают законы механики при преобразовании Лоренца. (Пока что мы объяснили, как изменяются длина и время, но не то, как мы получаем измененную формулу для m (3.1). Мы сделаем это в следующей главе.) Изучение следствий формулы Эйнштейна для массы m в механике Ньютона начнем с закона Ньютона о том, что сила представляет собой скорость изменения импульса, или

$$\mathbf{F} = d(m\mathbf{v})/dt.$$

Импульс движения по-прежнему равен $m\mathbf{v}$, но при использовании нового значения m оно превращается в

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3.10)$$

Это законы Ньютона в записи Эйнштейна. При таком видоизменении, если действие и противодействие равны (что может быть не так на отдельных участках, но справедливо в общем), то, как и раньше, импульс должен сохраняться, но сохраняющаяся величина — это не старое $m\mathbf{v}$ при постоянном m , а выражение с переменной массой, показанное в (3.10). Когда в формулу для импульса внесено это изменение, закон сохранения импульса по-прежнему работает.

Теперь рассмотрим, как импульс зависит от скорости. В механике Ньютона он пропорционален скорости. В значительном диапазоне скоростей (небольших по сравнению с c) они также примерно пропорциональны и в релятивистской механике, поскольку выражение с квадратным корнем мало отличается от единицы. Но когда v почти равно c , этот корень приближается к нулю, а импульс стремится к бесконечности.

Что происходит, если постоянная сила действует на некоторое тело в течение долгого времени? В механике Ньютона скорость тела продолжает увеличиваться, пока не превысит скоро-

сти света. Но в релятивистской механике такое невозможно. В релятивистской механике растет не скорость тела, а его импульс, который может непрерывно расти, потому что растет масса. Через некоторое время ускорение, т. е. изменение скорости, практически исчезает, но импульс продолжает расти. Если сила производит очень малое изменение в скорости тела, мы говорим, что тело обладает большой инерцией, и именно это говорит наша формула для релятивистской массы (см. 3.10) — она говорит, что инерция очень велика, когда v почти равно c . Разберем пример. Чтобы отклонить быстрые электроны в синхротроне КАЛТЕХ'а, необходимо магнитное поле, которое в 2000 раз мощнее того, что следует из законов Ньютона. Другими словами, масса электронов в этом синхротроне в 2000 раз больше их нормальной массы и достигает массы протона! Если m в 2000 раз больше m_0 , то $1 - v^2/c^2$ равно $1/4000000$, а это значит, что v^2/c^2 отличается от единицы на одну четырехмиллионную, а v отличается от c на одну восьмимиллионную, так что скорость электронов весьма близко подходит к скорости света. Если электроны и свет стартовали бы одновременно от синхротрона в сторону соседней лаборатории (которая находится на расстоянии примерно 200 м), кто пришел бы к финишу раньше? Конечно свет, потому что свет всегда движется быстрее*. Насколько раньше? На этот вопрос трудно ответить — вместо этого мы скажем, на какое расстояние свет опередит электроны: около $1/40$ мм, или четверть толщины листа бумаги! Когда электроны движутся с такой скоростью, их масса огромна, но их скорость не может превзойти скорость света.

Давайте теперь взглянем на некоторые другие следствия релятивистского роста массы. Рассмотрим движение молекул в небольшом резервуаре с газом. Когда газ нагревается, скорость молекул возрастает, поэтому масса также возрастает, и газ становится тяжелее. Приближенная формула для роста массы при малых скоростях может быть получена разложением в ряд выражения $m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2} = m_0(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Получается

$$m_0(1 - v^2/c^2)^{-1/2} = m_0(1 + \frac{1}{2}v^2/c^2 + \frac{3}{8}v^4/c^4 + \dots).$$

* На самом деле электроны выиграли бы соревнование у видимого света из-за коэффициента преломления в воздухе. А гамма-лучи добились бы еще более высоких результатов.

Из этой формулы ясно, что при малых v ряд быстро сходится, и можно пренебречь всеми членами, кроме первых двух. Поэтому можно написать

$$m \cong m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \left(\frac{1}{c^2} \right), \quad (3.11)$$

где второй член в правой части выражает рост массы, вызванный скоростью молекул. Когда температура растет, v^2 растет пропорционально ей, так что мы можем сказать, что увеличение массы пропорционально повышению температуры. Но поскольку $\frac{1}{2} m_0 v^2$ — это кинетическая энергия в старомодном ньютоновском смысле, можно сказать, что прирост массы газа равен приросту кинетической энергии, деленному на c^2 , $\Delta m = \Delta(\text{К.Э.})/c^2$.

3.9. Связь массы и энергии

Сделанное выше наблюдение привело Эйнштейна к предположению, что можно найти более простое выражение для массы, чем формула (3.1), если указать, что масса равна полной энергии тела, деленной на c^2 . Умножив (3.11) на c^2 , получим

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots \quad (3.12)$$

Здесь левая часть выражает полную энергию тела, а в последнем члене в правой части мы узнаем обычную кинетическую энергию. Эйнштейн интерпретировал постоянный член $m_0 c^2$ как часть полной энергии тела — внутреннюю энергию, известную как «энергия покоя».

Давайте рассмотрим последствия сделанного Эйнштейном предположения, что *энергия тела всегда равна mc^2* . В качестве интересного результата мы получим формулу (3.1) зависимости массы от скорости, которую до сих пор мы просто предполагали справедливой. Пусть тело сперва покоится, его энергия равна $m_0 c^2$. Затем приложим к телу силу, которая заставляет его двигаться и сообщает ему кинетическую энергию; следовательно, поскольку энергия увеличилась, то увеличилась и масса (это подразумевается в нашем исходном предположении). Пока сила действует, энергия и масса продолжают увеличиваться. Мы уже

видели (глава 13^{*}), что скорость изменения энергии со временем равна силе, умноженной на скорость, или

$$\frac{dE}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}. \quad (3.13)$$

Мы знаем также (глава 9^{*}, формула 9.1), что $F = d(mv)/dt$. Подставив в (3.13) это выражение с учетом определения E , получим

$$\frac{d(mc^2)}{dt} = \mathbf{v} \cdot \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}. \quad (3.14)$$

Мы хотим решить это уравнение относительно m . Для этого сначала умножим обе части на $2m$, в результате чего (3.14) превратится в

$$c^2(2m)\frac{dm}{dt} = 2m\mathbf{v} \cdot \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}. \quad (3.15)$$

Нам необходимо избавиться от производных, т. е. проинтегрировать обе части. Величина $(2m)dm/dt$, как можно видеть, — это производная по времени от m^2 , а $(2m\mathbf{v}) \cdot d(m\mathbf{v})/dt$ — это производная по времени от $(m\mathbf{v})^2$. Следовательно, (3.15) равносильно выражению

$$c^2 \frac{d(m^2)}{dt} = \frac{d(m^2 v^2)}{dt}. \quad (3.16)$$

Если производные двух величин равны, то сами величины различаются не более чем на константу C . Это позволяет нам написать

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + C. \quad (3.17)$$

Нам нужно определить константу C явным образом. Поскольку выражение (3.17) должно быть справедливо для всех скоростей, то можно взять $v = 0$ и обозначить в этом случае массу через m_0 . Подстановка этих значений в (3.17) дает

$$m_0^2 c^2 = 0 + C.$$

* из первоначальных «Лекций по физике», том I.

Теперь можно подставить это значение C в (3.17), которое примет вид

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + m_0^2 c^2. \quad (3.18)$$

Деление на c^2 и перегруппировка членов дает

$$m^2 (1 - v^2/c^2) = m_0^2,$$

откуда получаем

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (3.19)$$

А это и есть формула (3.1), и именно это необходимо для выполнения соотношения между массой и энергией (3.12).

В обычных условиях эти изменения энергии приводят к незначительным изменениям массы, поскольку в большинстве случаев мы не можем извлечь большую энергию из данного количества вещества; но, например, для атомной бомбы с эквивалентом 20 килотонн тринитротолуола весь пепел, осевший после взрыва, на 1 грамм легче первоначальной массы расщепляющегося материала из-за высвободившейся энергии, т. е. выделенная энергия имела массу 1 грамм, в соответствии с соотношением $\Delta E = \Delta(m c^2)$. Эта теория эквивалентности массы и энергии была блестяще подтверждена экспериментами, в которых материя аннигилирует — полностью превращается в энергию. Электрон и позитрон, каждый с энергией покоя m_0 , сводятся вместе. После взаимодействия они распадаются, испуская два γ -луча, каждый с энергией $m_0 c^2$. Этот эксперимент прямо сообщает нам об энергии, связанной с существованием массы покоя частицы.



4

Релятивистская энергия и релятивистский импульс

4.1. Относительность и философия

В этой главе мы продолжим обсуждение принципа относительности Эйнштейна—Пуанкаре, так как он оказывает влияние на наши воззрения в области физики и других областях человеческой мысли.

Пуанкаре сформулировал принцип относительности следующим образом: «Согласно принципу относительности законы физических явлений должны быть одинаковыми и для неподвижного наблюдателя, и для наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью относительно него, так что у нас нет и, возможно, не может быть способа определить, не находимся ли мы в таком движении».

Когда эта мысль распространилась по миру, она вызвала большое возбуждение среди философов, в особенности среди «философов с коктейлем», которые говорят: «О, это очень просто — теория Эйнштейна говорит, что все относительно!» Удивительно большое число таких философов, и не только таких, кого можно найти на званых вечерах с коктейлем (мы будем просто называть их «философами с коктейлем»), скажут: «Из открытий Эйнштейна следует, что все относительно, и это оказало глубокое влияние на наши идеи». И добавят: «В физике было доказано, что явления зависят от вашей системы отсчета». Мы слышали это много раз, но трудно понять, что это значит. Вероятно, упомянутая система отсчета — это система координат, которую мы использовали при анализе теории относительности. Значит, имеется в виду, что тот факт, что «все зависит от вашей системы отсчета», оказал глубокое влияние на современную мысль. Вполне можно удивиться, почему? Ведь, в конце концов, идея о том, что «все зависит от вашей точки зрения», настолько про-

ста, что для ее постижения вовсе не надо прибегать к физической теории относительности. То, что видимое нами зависит от нашей системы отсчета, известно каждому, кто ходил пешком, потому что он видит приближающегося пешехода сначала спереди, а потом сзади. Большинство философских заключений, которые, как утверждается, проистекают из теории относительности, ничуть не глубже простого замечания «человек выглядит спереди иначе, чем сзади». Еще одним примером взгляда философа на теорию относительности может служить старая история о слоне, которого по-разному описывали несколько слепцов.

Конечно же, в теории относительности должны быть более глубокие вещи, чем это простое замечание — «человек выглядит спереди иначе, чем сзади». Принцип относительности глубже этого, потому что *с его помощью мы можем делать определенные предсказания*. Но было бы довольно удивительно, если бы мы могли предсказывать поведение природы, исходя из такого простого наблюдения.

Есть и другая школа философов, которые чувствуют себя неуютно из-за теории относительности, утверждающей, что мы не можем определить свою абсолютную скорость, не глядя на какой-либо внешний предмет. Они говорят: «Это же очевидно, что невозможно определить скорость, не выглядывая наружу. Говорить об этом просто бессмысленно; физики ведут себя глупо, думая иначе, но почему они решили, что все дело в этом? Если бы мы, философы, знали, в чем проблема физиков, мы могли бы быстро сделать умозаключение, что нельзя определить скорость, не глядя на внешний предмет. Тем самым мы внесли бы огромный вклад в физику». Подобные философы все время пытаются что-то нам сказать, но они на самом деле не понимают тонкости и глубины этой проблемы.

Наша неспособность распознать абсолютное движение — это результат *эксперимента*, а не итог простого размышления, что можно легко пояснить. Прежде всего, еще Ньютон полагал, что невозможно определить скорость собственного движения, если это движение равномерное и прямолинейное. На самом деле именно Ньютон первым провозгласил принцип относительности (слова, процитированные в предыдущей главе, принадлежат Ньютону). Почему же в те, ньютоновские времена философы не поднимали шум по поводу того, что «все относительно»? Потому что до появления теории электродинамики Максвелла физические законы предполагали, что *можно* измерить свою скорость,

не глядя на внешние предметы; но вскоре после Максвелла было *экспериментально* установлено, что это невозможно.

Действительно ли абсолютно, определенно, философски *необходимо*, чтобы наблюдатель не мог сказать, с какой скоростью он движется, не взглянув на это движение со стороны? Одним из следствий теории относительности явилась философия, которая гласила: «Вы можете определить только то, что можете измерить! Поскольку само собой разумеется, что нельзя измерить скорость, не видя, по отношению к чему она измеряется, следовательно, понятие абсолютной скорости не имеет *смысла*. Физики должны понять, что можно говорить лишь о том, что поддается измерению». Но в этом и заключается вся проблема: возможность определить абсолютную скорость — это тот же вопрос, что и возможность для наблюдателя определить с помощью опыта, без взгляда со стороны, движется ли он. Другими словами, вопрос о том, можно ли измерить нечто, решается не с помощью одного лишь размышления, не априори, а только путем опыта. Найдется немного философов, которые станут спокойно утверждать как очевидное, что если скорость света внутри автомобиля 300000 км/с, а сам автомобиль движется со скоростью 100000 км/с, то свет движется относительно наблюдателя на дороге также со скоростью 300000 км/с. Их этот факт шокирует; те же самые люди, которые делали заявления об очевидности, столкнувшись с конкретным фактом, обнаруживают, что это отнюдь не очевидно.

Наконец, существует даже философия, заявляющая, что *никакое* движение не может быть определено иначе, чем путем взгляда со стороны. А уж это просто неверно. На самом деле, нельзя определить, происходит ли *равномерное прямолинейное* движение, но если начнет вращаться вся комната, вы наверняка узнаете это, поскольку всех присутствующих отбросит к стене, как следствие «центробежного» эффекта. Тот факт, что Земля вращается вокруг своей оси, можно обнаружить, не глядя на звезды, например, с помощью так называемого маятника Фуко. Поэтому неверно, что «все относительно»; только *равномерную* скорость нельзя определить без взгляда со стороны. *Равномерное вращение* вокруг фиксированной оси определить можно. Когда это сообщается философу, он теряет душевное равновесие, потому что не может понять этого, поскольку ему кажется невозможным определить вращение вокруг оси без взгляда со стороны. Если философ достаточно сообразителен, то через не-

которое время он может вернуться и сказать: «Понял! На самом деле не существует никакого абсолютного вращения; в действительности мы вращаемся относительно звезд. А некоторое влияние звезд на объект может вызывать центробежную силу».

Насколько известно, это верно; в настоящее время у нас нет способа узнать, существовала бы центробежная сила, если бы вокруг нас не было звезд и туманностей. Мы не можем провести такой эксперимент — удалить все туманности, а затем измерить наше вращение, так что нам просто это неизвестно. Мы должны признать, что этот философ может оказаться прав. Поэтому он возвращается, сияющий, и говорит: «А вообще совершенно необходимо, чтобы мир в конце концов оказался таким: *абсолютное* вращение — это бессмысленно; вращение возможно только *относительно* туманностей». Тогда мы говорим ему: «Итак, друг мой, скажи: очевидно или не очевидно, что равномерное прямолинейное движение *относительно туманностей* не должно никак чувствоваться внутри автомобиля?» Теперь, когда это движение больше не абсолютно, когда оно стало движением относительно туманностей, вопрос становится таинственным, и на него можно ответить только путем эксперимента.

Каково же тогда философское влияние на теорию относительности? Какие *новые идеи и предположения* предлагает физику теория относительности? Если мы ограничимся только таким влиянием, то сможем описать некоторые из них следующим образом. Первое открытие заключается в том, что даже те идеи, которые существовали очень долгое время и были тщательно проверены, могли оказаться ошибочными. Конечно же, потрясением было — открыть, что законы Ньютона, долгие годы считавшиеся точными, оказались неверны. Ясно, что ошибка заключалась не в экспериментах, а в том, что они проводились в ограниченном диапазоне скоростей, настолько малом, что эффекты относительности не могли проявиться. Но, тем не менее, теперь мы гораздо более сдержанно смотрим на наши физические законы — любой из них *может* оказаться неверным!

Во-вторых, если возникают некие «странные» идеи, вроде той, что время при движении замедляется, и тому подобных, то неважно, нравятся они нам или нет. Существенным является только то, согласуются ли эти идеи с тем, что обнаружено экспериментально. Другими словами, «странные» идеи должны согласовываться только с *экспериментом*, и единственной причи-

ной, по которой мы обсуждали поведение часов и так далее, было желание продемонстрировать, что, хотя идея о растяжении времени представляется странной, она *согласуется* с нашим способом измерения времени.

Наконец, третий момент, имеющий несколько более технический характер, но оказавшийся чрезвычайно полезным в нашем изучении других физических законов. Он состоит в том, что надо обращать внимание на *симметрию законов*, или точнее, видеть способы, с помощью которых эти законы могут быть преобразованы, сохраняя при этом свою форму. Когда мы обсуждали теорию векторов, мы отмечали, что основные законы движения не изменяются при вращении системы координат, а теперь мы узнали, что они не изменяются и при изменении переменных пространства и времени (в соответствии с преобразованием Лоренца). Так что идея изучения видов операций, при которых фундаментальные законы не изменяются, оказалась весьма полезной.

4.2. Парадокс близнецов

Чтобы продолжить наше изучение преобразования Лоренца и релятивистских эффектов, рассмотрим знаменитый «парадокс» — парадокс близнецов Питера и Пола. Когда они выросли достаточно для того, чтобы совершать космические путешествия, Пол улетает с очень высокой скоростью. Питер остается на Земле. Он видит, что Пол движется с большой скоростью, и ему кажется, что все часы Пола идут медленнее, его пульс замедляется, его мысли замедляются, все происходит медленнее. Пол, конечно, не замечает ничего необычного, но если он, пропутешествовав некоторое время, возвращается назад, он окажется моложе Питера, оставшегося на Земле! Это действительно так; это одно из следствий теории относительности, которое легко продемонстрировать. Точно так же, как μ -мезоны живут дольше, когда они движутся, Пол будет жить дольше, если будет двигаться. «Парадоксом» это называют те люди, которые полагают, что принцип относительности означает, что *все движения относительны*. Они говорят: «Ага, не можем ли мы сказать, что с точки зрения Пола движется *Питер* и потому должен стареть медленнее? Вследствие симметрии единственно возможный результат: при встрече оба должны быть одного возраста».

Но для того, чтобы встретиться и провести это сравнение, Пол должен либо остановиться в конце путешествия и провести сравнение часов, либо, проще, он должен вернуться. А возвратиться может только тот, кто двигался. И он знает это, потому что должен повернуть. Когда он разворачивается, с его космическим кораблем происходят разные необычные события — включается двигатель, все предметы прижимаются к одной стенке и так далее — в то время как Питер не чувствует ничего этого.

Поэтому сформулировать правило надо следующим образом: *человек, который чувствует ускорение*, который видит, как предметы прижимаются к стенкам и так далее, и есть тот, кто окажется моложе. Различие между братьями имеет «абсолютный» смысл, и это вполне корректно. Когда мы обсуждали, что движущиеся мю-мезоны живут дольше, мы использовали в качестве примера их прямолинейное движение в атмосфере. Но мы можем также создать мю-мезоны в лаборатории и с помощью магнита заставить их двигаться по кривой. И даже при этом движении с ускорением они проживут дольше, причем столько же, сколько и при прямолинейном движении. Мы могли бы избавиться от парадокса опытным путем: можно сравнить неподвижный мю-мезон с тем, который совершает полный круг. И наверняка окажется, что мю-мезон, совершивший круг, живет дольше. Хотя мы и не проводили эксперимента с полным кругом, в нем совершенно нет необходимости, поскольку всё очень хорошо согласуется. Возможно, это не удовлетворит тех, кто настаивает на проверке каждого факта, но мы уверенно предсказываем результат эксперимента, в котором Пол совершает полный круг.

4.3. Преобразование скоростей

Главное различие между принципом относительности Эйнштейна и принципом относительности Ньютона состоит в том, что законы преобразований, связывающие координаты и времена для движущихся относительно друг друга систем, различны. Правильный закон преобразований — это преобразование Лоренца

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},$$

$$\begin{aligned}y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.\end{aligned}\tag{4.1}$$

Эти уравнения соответствуют относительно простому случаю, когда наблюдатели движутся относительно друг друга вдоль общей оси x . Конечно, возможны и другие направления движения, но самое общее преобразование Лоренца довольно сложно: в нем перемешаны вместе все четыре величины. Мы будем по-прежнему пользоваться этой упрощенной формой, поскольку она отражает все основные черты теории относительности.

Давайте теперь рассмотрим некоторые другие следствия из этого преобразования. Во-первых, интересно решить эти уравнения относительно x , y , z , t . Это система четырех линейных уравнений с четырьмя неизвестными, и ее можно решить, выразив x , y , z , t через x' , y' , z' , t' . Результат весьма интересен, так как он указывает нам, как «покоящаяся» система координат выглядит с точки зрения «движущейся». Конечно, поскольку движения относительны и происходят с постоянной скоростью, наблюдатель, который «движется», может сказать, если захочет, что на самом деле движется другой, а сам он неподвижен. А так как он движется в противоположном направлении, то преобразование должно быть тем же самым, но с противоположным знаком у скорости. Именно это мы обнаруживаем в результате прямого решения системы. Если бы это было иначе, у нас было бы серьезное основание для беспокойства!

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\y &= y', \\z &= z', \\t &= \frac{t' + ux'/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.\end{aligned}\tag{4.2}$$

Далее мы займемся интересным вопросом о сложении скоростей в теории относительности. Напомним: одна из первоначальных загадок состояла в том, что свет движется со скоростью 300000 км/с во всех системах, даже если они находятся в относительном движении. Это — частный случай более общей задачи, которую можно показать на следующем примере. Предположим, что некоторый предмет внутри космического корабля движется вперед со скоростью 200000 км/с и сам корабль движется со скоростью 200000 км/с. С какой скоростью движется предмет внутри корабля с точки зрения внешнего наблюдателя? Мы могли бы захотеть сказать — 400000 км/с, что больше скорости света. Это довольно неприятно, поскольку не должно быть движения быстрее света!

Общая постановка задачи такова. Пусть предмет внутри корабля с точки зрения наблюдателя, находящегося внутри, движется со скоростью v , а сам корабль по отношению к Земле имеет скорость u . Мы хотим знать, с какой скоростью v_x этот предмет движется с точки зрения наблюдателя на Земле. Это, конечно, по-прежнему частный случай, потому что движение происходит в направлении оси x . Могут быть также преобразования для скоростей в направлении оси y или в любом другом; в случае необходимости их можно вывести. Внутри корабля скорость равна v_x , это означает, что перемещение x' равно скорости, умноженной на время:

$$x' = v_x t'. \quad (4.3)$$

Теперь нам осталось вычислить, каковы у тела значения x и t с точки зрения внешнего наблюдателя, если x' и t' связаны соотношением (4.2). Поэтому мы просто подставляем (4.3) в (4.2) и получаем

$$x = \frac{v_x t' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.4)$$

Но здесь x выражено через t' . Чтобы получить ту скорость, которую воспринимает внешний наблюдатель, мы должны разделить *его расстояние на его время*, а не на время другого человека! Поэтому нам надо также вычислить время с его позиции

$$t = \frac{t' + u(v_x t')/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.5)$$

Теперь находим отношение x к t . После сокращения квадратных корней получаем

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{u + v_{x'}}{1 + uv_{x'}/c^2}. \quad (4.6)$$

Это и есть искомый закон: результирующая скорость не равна алгебраической сумме этих скоростей (мы знаем, что этого и не должно быть, иначе у нас возникают неприятности), а «скорректирована» знаменателем $1 + uv/c^2$.

Давайте посмотрим теперь, что происходит. Предположим, что мы движемся внутри космического корабля со скоростью, равной половине скорости света, и сам корабль движется со скоростью, равной половине скорости света. Тогда u равно $\frac{1}{2}c$ и v равно $\frac{1}{2}c$, но в знаменателе uv/c^2 делится на 4, поэтому

$$v = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{1}{2}c}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{4c}{5}.$$

По теории относительности выходит, что «половина» и «половина» составляют не «единицу», а $4/5$. Конечно, небольшие скорости могут вполне складываться привычным способом, потому что пока скорости малы по сравнению со скоростью света, мы можем забыть о знаменателе $(1 + uv/c^2)$; но все становится иным и более интересным при больших скоростях.

Давайте рассмотрим предельный случай. Просто из любопытства предположим, что человек внутри космического корабля наблюдает, как распространяется свет. Другими словами, $v = c$, и при этом космический корабль движется. Как это будет выглядеть для наблюдателя на Земле? Ответ будет таков:

$$v = \frac{u + c}{1 + uc/c^2} = c \frac{u + c}{u + c} = c.$$

Следовательно, если что-либо движется со скоростью света внутри корабля, с точки зрения человека на Земле оно также будет двигаться со скоростью света! Это хорошо, ибо именно это утверждает теория относительности Эйнштейна.

Конечно, возможны случаи, когда движение тела происходит не по направлению равномерного движения корабля. Например, объект внутри корабля может двигаться «вверх» со

скоростью v_y относительно корабля, а сам корабль движется «горизонтально». Прделаем то же самое (только используя y вместо x) и получим

$$y = y' = v_y \cdot t',$$

так что если $v_x = 0$,

$$v_y = \frac{y}{t} = v_y \cdot \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (4.7)$$

Таким образом, боковая скорость тела уже не v_y , а $v_y \cdot \sqrt{1 - u^2/c^2}$.

Мы получили этот результат, пользуясь формулами преобразований, но мы могли также получить его непосредственно из принципа относительности по следующей причине (всегда полезно посмотреть, можем ли мы понять причину). Мы уже обсуждали (рис. 3.3), как могут работать движущиеся часы; свет кажется распространяющимся под углом со скоростью c в неподвижной системе, в то время как он просто движется вертикально с той же скоростью в движущейся системе. Мы обнаружили, что вертикальная компонента скорости в неподвижной системе меньше скорости света, так как имеет множитель $\sqrt{1 - u^2/c^2}$ [см. (3.3)]. А теперь предположим, что мы заставляем некоторую материальную частицу двигаться в тех же часах взад и вперед, но со скоростью, равной $1/n$ скорости света (где n — целое число) (рис. 4.1). Тогда за то время, когда частица совершит один полет туда и обратно, свет проделает это ровно n раз. То есть каждый «щелчок» частицы совпадет с каждым n -ым «тиканьем» световых часов. *Этот факт должен иметь место и тогда, когда вся система движется, потому что*

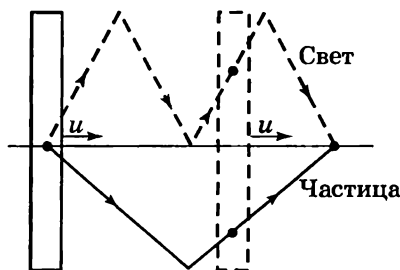


Рис. 4.1. Траектория луча света и частицы внутри движущихся часов

физическое явление совпадения остается совпадением в любой системе. Следовательно, поскольку скорость c_y меньше скорости света, скорость v_y частицы должна быть меньше соответствующей скорости на тот же множитель с квадратным корнем! Именно поэтому квадратный корень появляется в любой вертикальной скорости.

4.4. Релятивистская масса

В предыдущей главе мы узнали, что масса тела возрастает с ростом скорости, но не было дано никаких доказательств этого в том смысле, что мы не привели никаких аргументов, подобных тем, что использовались в примере с часами. Однако мы *можем* показать, что (вследствие принципа относительности и некоторых других разумных предположений) масса должна изменяться именно таким образом. (Мы вынуждены говорить о «некоторых других предположениях», потому что нельзя ничего доказать, пока у нас не будет каких-то законов, которые полагаются справедливыми, если мы рассчитываем делать разумные умозаключения.) Чтобы не изучать законы преобразования силы, мы будем анализировать столкновение частиц, при котором нам ничего не надо знать о законах силы, кроме того, что мы будем предполагать сохранение импульса и энергии. Кроме того, будем предполагать, что импульс движущейся частицы — это вектор, направление которого всегда совпадает с направлением скорости. Однако мы не будем считать импульс *пропорциональным* скорости, как считал Ньютон, но будем считать, что он является лишь некоторой *функцией* скорости. Тогда мы можем записать импульс как вектор скорости, умноженный на некоторый коэффициент:

$$\mathbf{p} = m_v \mathbf{v}. \quad (4.8)$$

Индекс v у коэффициента будет напоминать нам, что он является функцией скорости, и мы условимся называть этот коэффициент m_v «массой». Конечно, когда скорость мала, он является той самой массой, которую мы привыкли измерять. Теперь мы постараемся показать, что выражение для m_v должно иметь вид $m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, утверждая согласно принципу относительности, что законы физики должны быть теми же самыми в любой системе координат.

Предположим, что у нас есть две частицы (например, два протона), которые абсолютно одинаковы, и они движутся навстречу друг другу со строго одинаковыми скоростями. Их общий импульс равен нулю. Что же может произойти? После столкновения их направления движения должны остаться строго противоположными, потому что иначе мы получим ненулевой суммарный вектор импульса. Они также должны иметь одинаковую скорость, поскольку это в точности одинаковые частицы; фактически они должны иметь ту же скорость, с какой они стартовали, иначе изменится энергия при столкновении. Поэтому диаграмма упругого обратимого столкновения будет выглядеть так, как показано на рис. 4.2, а: все стрелки имеют одинаковую длину, все скорости равны. Будем предполагать, что такие столкновения всегда можно подготовить, что в них допустимы любые углы θ и любые значения начальной скорости частиц. Далее заметим, что одному и тому же столкновению можно придать другой вид, повернув оси. Для удобства мы повернем оси так, чтобы горизонтальная ось делила рисунок пополам, как показано на рис. 4.2, б. Это то же столкновение, только с повернутыми осями.

И вот в чем заключается фокус: давайте взглянем на это столкновение с точки зрения наблюдателя, движущегося в автомобиле со скоростью, равной горизонтальной составляющей скорости частицы. Как тогда будет выглядеть столкновение? Наблюдателю покажется, что частица 1 движется вертикально вверх, поскольку потеряла горизонтальную составляющую своей скорости, а затем будет двигаться вертикально вниз. То есть столкновение выглядит так, как показано на рис. 4.3, а. Частица 2, однако, движется иначе, когда мы проезжаем мимо нее, кажется, что она пролетает с огромной скоростью и под меньшим углом (углы до и после столкновения *равны*). Обозна-

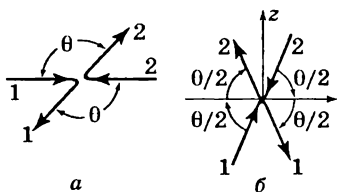


Рис. 4.2. Упругое столкновение разных тел, движущихся с равными скоростями в противоположных направлениях, при различном выборе системы координат

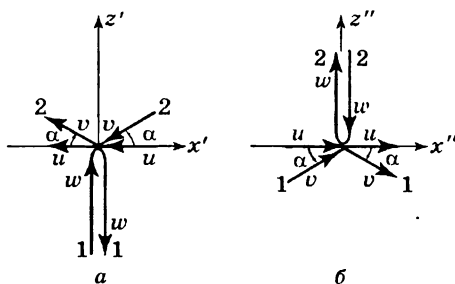


Рис. 4.3. Еще две картины того же столкновения (из движущегося автомобиля)

чим через u горизонтальную составляющую скорости частицы 2, а через w вертикальную скорость частицы 1.

Возникает вопрос: чему равна вертикальная скорость $utg\alpha$ частицы 2. Если бы мы знали это, то могли бы получить правильное выражение для импульса, используя закон сохранения импульса в вертикальном направлении. Ясно, что горизонтальная составляющая количества движения остается постоянной; она одинакова для обеих частиц, а для частицы 1 вообще равна нулю. Так что нам нужно использовать закон сохранения только для вертикальной скорости $utg\alpha$. Но мы можем получить вертикальную скорость, просто взглянув на это столкновение с другой точки зрения! Если мы взглянем на столкновение, изображенное на рис. 4.3, а, из автомобиля, движущегося влево со скоростью u , мы увидим то же столкновение, только перевернутое «вверх ногами», как показано на рис. 4.3, б. Теперь частица 2 движется вверх и вниз со скоростью w , а частица 1 имеет горизонтальную скорость u . Конечно, теперь вы догадались, чему равна вертикальная скорость $utg\alpha$: это $w\sqrt{1 - u^2/c^2}$ [см. (4.7)]. Мы знаем, что изменение импульса вертикально движущейся частицы равно

$$\Delta p = 2m_w w$$

(2 потому, что частица движется вверх и вниз). Частица, движущаяся наклонно, имеет некоторую скорость v , составляющие которой равны u и $w\sqrt{1 - u^2/c^2}$, и масса ее m_v . Следовательно, изменение вертикального импульса этой частицы $\Delta p' = 2m_v w\sqrt{1 - u^2/c^2}$, по-

скольку в соответствии с предполагаемым законом (4.8) составляющая импульса всегда равна массе, соответствующей величине скорости, умноженной на составляющую скорости в интересующем нас направлении. Поэтому, чтобы суммарный импульс равнялся нулю, вертикальные импульсы должны взаимно уничтожаться, и отношение массы, движущейся со скоростью w , к массе, движущейся со скоростью v , должно быть равным

$$\frac{m_w}{m_v} = \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (4.9)$$

Рассмотрим предельный случай, когда w бесконечно мало. При малых w величины v и u практически равны. В этом случае $m_w \rightarrow m_0$ и $m_v \rightarrow m_u$. Окончательный результат таков:

$$m_u = \frac{m_0}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.10)$$

Интересным упражнением теперь будет проверить, действительно ли уравнение (4.9) справедливо для произвольных значений w , если для массы справедлива формула (4.10). Заметим, что скорость, которая входит в (4.9), может быть определена из прямоугольного треугольника:

$$v^2 = u^2 + w^2(1 - u^2/c^2).$$

Это соотношение выполняется автоматически, хотя мы будем использовать его при малых w .

Теперь примем, что импульс сохраняется и масса зависит от скорости согласно (4.10), и посмотрим, какие еще выводы мы можем сделать. Давайте рассмотрим так называемое *неупругое столкновение*. Для простоты предположим, что два одинаковых тела движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями w , сталкиваются и образуют новое тело, которое больше не распадается, как показано на рис. 4.4, *a*. Масса каждого тела до столкновения равна, как мы знаем, $m_0/\sqrt{1 - w^2/c^2}$. Если мы предполагаем сохранение импульса и принимаем принцип относительности, то можем продемонстрировать интересное свойство массы вновь образовавшегося тела. Представим себе бесконечно малую скорость u , перпендикулярную скорости w (мы можем проделать то же самое с конечной скоростью u , но вопрос

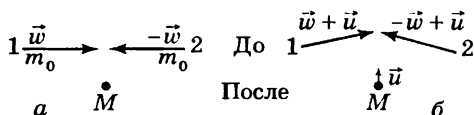


Рис. 4.4. Две картины неупругого столкновения тел равной массы

легче понять при бесконечно малой скорости), взглянем на это столкновение из лифта, движущегося со скоростью $-u$. То, что мы увидим, показано на рис. 4.4, б. Составное тело имеет неизвестную массу M . Теперь у тела 1, как и у тела 2, есть вертикальная составляющая скорости u и горизонтальная составляющая, которая практически равна w . После столкновения у нас появляется масса M , движущаяся вверх со скоростью u , много меньшей и скорости света и скорости w . Импульс должен сохраниться, поэтому давайте оценим его до и после столкновения. До столкновения он был $p \sim 2m_w u$, а после столкновения стал $p' = M_u u$, но M_u практически совпадает с M_0 , потому что u мало. Эти величины должны быть равны вследствие сохранения импульса, и поэтому

$$M_0 = 2m_w. \quad (4.11)$$

Итак, масса тела, образованного при столкновении двух одинаковых тел, равна их удвоенной массе. Вы можете сказать: «Да, конечно, это просто сохранение масс». Не следует торопиться с «да, конечно», потому что эти массы больше, чем массы покоящихся тел, и в массу M входят не массы покоя, а *бóльшие* величины. Как это ни удивительно, но закон сохранения импульса в случае столкновения двух тел требует, чтобы образуемая ими масса была больше масс покоя тел, даже при том, что после столкновения объекты придут в состояние покоя!

4.5. Релятивистская энергия

В прошлой главе мы показали, что зависимость массы от скорости и законы Ньютона приводят к изменению кинетической энергии тела, возникающему в результате работы действующих на него сил и равному

$$\Delta T = (m_u - m_0)c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - m_0 c^2. \quad (4.12)$$

Мы даже пошли дальше и догадались, что полная энергия тела равна полной массе, умноженной на c^2 . Теперь продолжим рассуждения.

Предположим, что наши два столкнувшихся тела равной массы по-прежнему могут быть «видимы» внутри M . Например, протон и нейтрон «склеиваются», но продолжают совершать движение внутри M . Тогда масса M , как мы обнаружили, равна не $2m_0$, а $2m_w$. Поскольку вклад в суммарную массу равен $2m_w$, а масса покоя находящихся внутри объектов равна $2m_0$, *избыток* массы составного объекта равен привнесенной кинетической энергии. Это, конечно, означает, что *энергия обладает инерцией*. В прошлой главе мы обсуждали нагревание газа и показали, что из-за движения молекул газ становится тяжелее; когда мы даем газу дополнительную энергию, его молекулы движутся быстрее, и газ становится тяжелее. На самом деле такое рассуждение имеет общий характер, наше обсуждение свойств неупругого столкновения показывает, что добавочная масса появляется в нем всегда, даже тогда, когда она не является *кинетической* энергией. Другими словами, если две частицы сталкиваются и образуется потенциальная либо другая форма энергии, если части составного тела замедляют движение, поднимаясь по склону холма и совершая работу против внутренних сил, или имеется другая аналогичная ситуация, во всех случаях масса тела равна полной привнесенной энергии. Отсюда мы видим, что сохранение массы, выведенное нами выше, эквивалентно сохранению энергии, поэтому в теории относительности нет места для строго неупругих столкновений, как это было в ньютоновской механике. Согласно механике Ньютона вполне допустимо столкновение двух тел и образование из них тела массой $2m_0$, которое ничем не отличается от тела, образованного медленным их сведением. Конечно, из закона сохранения энергии мы знаем, что внутри тела имеется добавочная кинетическая энергия, но согласно закону Ньютона это никак не влияет на массу. Теперь мы видим, что это невозможно: поскольку до столкновения у тел была кинетическая энергия, результирующий объект будет *тяжелее*, это будет *другой* объект. Когда мы соединяем тела медленно, то получаем объект массой $2m_0$; когда сталкиваем их с большой скоростью, мы получаем тело, масса которого больше. Поэтому в теории относительности сохранение импульса неизбежно сопровождается сохранением энергии.

Отсюда следуют интересные вещи. Например, пусть у нас есть тело с измеренной массой M , и предположим, что произошло нечто, в результате чего оно разлетелось на две равные части, имеющие скорость w и массу каждой части m_w . Теперь предположим, что эти части встречаются на своем пути достаточное количество вещества, заставляющего их замедлить скорость и остановиться; теперь их масса будет m_0 . Какое количество энергии они передали веществу, когда остановились? Согласно теореме, доказанной нами ранее, каждая часть передаст энергию $(m_w - m_0)c^2$. Она перейдет в разные формы, например в теплоту, потенциальную энергию или в другую форму. Так как $2m_w = M$, то высвобожденная энергия $E = (M - m_0)c^2$. Это уравнение использовалось, например, для оценки количества энергии, которая могла бы высвободиться при реакции расщепления в атомной бомбе (хотя части бомбы не в точности равны, но почти равны). Масса атома урана известна (она была измерена заранее); массы атомов, на которые он расщепляется — йод, ксенон и так далее, — также известны. (Под массой мы имеем в виду не массу атомов в движении, а их массу в состоянии *покоя*.) Другими словами, и M и m_0 известны, так что путем вычитания можно определить, сколько энергии высвободится, если M распздется «пополам». По этой причине беднягу Эйнштейна во всех газетах называли «отцом» атомной бомбы. Конечно, все это означает, что он мог заранее сказать, сколько энергии высвободится, если бы мы сказали ему, какой процесс произойдет. Оценка энергии, освобождаемой при расщеплении атома урана, была проведена лишь за полгода до первого испытания, и как только произошло реальное высвобождение энергии, кто-то непосредственно измерил ее (не будь формулы Эйнштейна, эту энергию измерили бы так или иначе), а с момента, когда она была измерена, формула была больше не нужна. Конечно, нам не следует преуменьшать заслуги Эйнштейна, скорее надо было бы покритиковать газеты и другие популярные описания развития физики и техники. Проблема, как сделать, чтобы все происходило эффективно и быстро, — это совсем другое дело.

Этот результат имеет значение и в химии. Например, если бы мы захотели взвесить молекулу углекислого газа и сравнить ее массу с массами молекул углерода и кислорода, то могли бы определить, сколько энергии высвобождается при образовании углекислого газа. Плохо только то, что разница между массами настолько мала, что это очень трудно выполнить технически.

Теперь давайте перейдем к вопросу о том, нужно ли прибавлять $m_0 c^2$ к кинетической энергии и заявлять, что полная энергия объекта равна mc^2 . Прежде всего, если бы мы могли *видеть* составляющие части с массой покоя m_0 внутри M , тогда мы могли бы сказать, что часть массы M составного объекта — это механическая масса покоя ее частей, другая часть — кинетическая энергия этих частей, а третья часть — их потенциальная энергия. Однако в природе открыты частицы различного рода, подвергшиеся реакциям, подобным тем, что мы рассматривали выше, и при всем желании *мы не можем видеть частей внутри M*. Например, когда K -мезон распадается на два пиона, это происходит в соответствии с законом (4.11), но бессмысленно считать, что K -мезон состоит из двух пионов, поскольку он распадается порой на три пиона!

Поэтому у нас возникает *новая идея*: нет нужды знать, из чего состоят объекты; нельзя и не нужно определять внутри частицы, какая часть энергии является энергией покоя частей, на которые она может разделиться. Неудобно и часто невозможно разбивать полную энергию mc^2 тела на энергию покоя его частей, кинетическую энергию частей и потенциальную энергию частей; вместо этого мы просто говорим о *полной энергии* частицы. Мы «сдвигаем начало отсчета» энергии, прибавляя ко всему константу $m_0 c^2$, и говорим, что полная энергия частицы равна ее массе движения, умноженной на c^2 , а когда тело неподвижно, энергия равна массе покоя, умноженной на c^2 .

Наконец, находим, что между скоростью v , импульсом P и полной энергией E имеется довольно простая связь. Как ни странно, формула $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ применяется на практике довольно редко. Вместо этого оказывается очень полезным применять следующие соотношения, которые нетрудно доказать:

$$E^2 - P^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (4.13)$$

и

$$Pc = Ev/c. \quad (4.14)$$



5

Пространство-время

5.1. Геометрия пространства-времени

Теория относительности показывает, что связь между положением события и временем, когда оно происходит, при измерении в двух разных системах координат, совсем не такая, как мы могли бы ожидать на основе наших интуитивных представлений. Очень важно, чтобы мы полностью понимали связь пространства и времени, описываемую преобразованием Лоренца, и поэтому в данной главе мы рассмотрим этот вопрос подробнее.

Преобразование Лоренца между координатами и временем (x, y, z, t) , измеренными «неподвижным» наблюдателем, и соответствующими координатами и временем (x', y', z', t') , измеренными внутри «движущегося» космического корабля, имеющего скорость u , имеют вид

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Давайте сравним эти уравнения с уравнениями (1.5), которые также связывают измерения в двух системах, одна из которых в данный момент *повернута* относительно другой:

$$\begin{aligned}x' &= x \cos\theta + y \sin\theta, \\y' &= y \cos\theta - x \sin\theta, \\z' &= z.\end{aligned}\tag{5.2}$$

В данном конкретном случае у Мо и Джо оси x и x' повернуты на угол θ . Мы замечаем, что в каждом случае величины со штрихом являются смесью величин без штриха: новое x' — это смесь x и y , новое y' — другая смесь x и y .

Проведем аналогию. Когда мы смотрим на некий предмет, мы различаем его «видимую ширину» и «видимую толщину». Но эти два понятия, «ширина» и «толщина», не являются *основными* свойствами предмета, ибо если мы сделаем шаг в сторону и взглянем на тот же предмет под другим углом, мы получим другую видимую ширину и другую видимую толщину. Можно вывести формулы для выражения новых значений через старые с учетом угла поворота. Уравнения (5.2) и есть такие формулы. Можно сказать, что данная толщина есть в некотором роде смесь всех толщин и всех ширин. Если бы было невозможно двигаться, и мы видели бы наш объект с одной и той же точки, тогда все рассуждения были бы излишними — мы всегда бы видели «истинную» ширину и «истинную» толщину и знали бы, что это совершенно разные качества предмета: одно из них связано с углом, под каким виден предмет, а другое требует фокусирования глаз или даже интуиции. Они казались бы совершенно разными, и мы никогда бы не смешивали их. Именно потому, что мы *можем* обойти вокруг объекта, мы понимаем, что ширина и толщина — это два разных аспекта одного и того же предмета.

Не можем ли мы взглянуть на преобразования Лоренца таким же образом? Здесь мы также имеем смесь — местоположения и времени. Из значений координаты и времени получается новая координата. Другими словами, в измерение пространства, сделанного одним человеком, подмешивается немного времени, как его видит другой человек. Наша аналогия позволяет нам сформулировать такую мысль: «реальность» предмета, на который мы смотрим, в некотором смысле больше (говоря грубо и образно), чем его «ширина» и его «толщина», потому что они зависят от того, *как* мы смотрим на предмет»; когда мы смещаемся в другое положение, наш мозг немедленно пересчитывает

ширину и толщину. Но наш мозг не может немедленно пересчитать координаты и время, когда мы движемся с большой скоростью, потому что у нас нет опыта движения со скоростью, близкой к скорости света, мы не ощущаем, что время и пространство имеют одну природу. Это похоже на то, как будто мы разглядываем ширину некоторого предмета, будучи привязанными к одному месту и не имея возможности сдвинуть голову ни в одну, ни в другую сторону. Как мы теперь понимаем, если бы мы могли, то увидели бы время другого человека — мы могли бы увидеть кое-что, находящееся, так сказать, «позади».

Поэтому мы будем пытаться представлять себе предметы в мире нового типа, где пространство и время перемешаны, в том же смысле, в каком предметы нашего обычного пространственного мира реальны и могут рассматриваться с разных сторон. Затем мы должны считать, что предметы, занимающие некоторое пространство и существующие некоторое время, представляют собой некий «комочек» мира нового типа, а мы смотрим на этот «комочек» с разных точек зрения, когда движемся с разными скоростями. Этот новый мир, эта геометрическая сущность, в которой существуют «комки», занимающие некоторое положение и имеющие некоторую протяженность во времени, называется *пространство-время*. Точка (x, y, z, t) в пространстве-времени называется *событием*. Представим, например, что мы провели ось x горизонтально, оси y и z в двух других направлениях, под «прямым углом» друг к другу и под «прямыми углами» к бумаге (!), а ось времени — вертикально. Как на этой диаграмме будет выглядеть движущаяся частица? Если частица неподвижна, она имеет некоторое значение x , и с течением времени это значение не меняется; тогда ее «траектория» является прямой, параллельной оси t (рис. 5.1, а). С другой стороны, если частица удаляется, тогда с течением времени возрастает x (рис. 5.1, б). Так что движение частицы, которая, например, начала двигаться вперед, а затем замедлила свой ход, будет иметь вид, показанный на рис. 5.1, в. Другими словами, устойчивая нераспадающаяся частица будет представлена некоторой линией в пространстве-времени. Распадающаяся частица будет представлена раздваивающейся линией, потому что она превращается в две частицы, начинающие свое движение из этой точки.

А как насчет света? Свет движется с одной скоростью c , и это будет представлено в виде прямой с постоянным углом наклона (рис. 5.1, г).

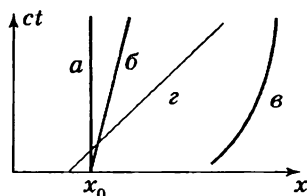


Рис. 5.1. Траектории трех частиц в пространстве-времени: *a* — неподвижная частица ($x = x_0$); *б* — частица, начинающая движение из точки $x = x_0$ с постоянной скоростью; *в* — частица, стартующая с большой скоростью, которая затем уменьшается; *г* — распространение света

Согласно нашей новой идее, если происходит какое-то событие, например, некоторая частица внезапно распадается в какой-то точке пространства-времени (x, t) на две новых, которые следуют по новым траекториям, и это интересное событие происходит при определенном значении x и определенном значении t , тогда нам, по-видимому, следует, если это имеет какой-то смысл, взять новую пару осей и повернуть их, что даст нам новое t и новое x в нашей новой системе, как показано на рис. 5.2, *a*. Но это не так, потому что (5.1) *не совпадает* с математическим преобразованием (5.2), в них по-разному расставлены знаки, в одном встречаются $\sin\theta$ и $\cos\theta$, а в другом содержатся алгебраические величины. (Конечно, нельзя говорить, что алгебраические величины не могут быть записаны в виде синусов и косинусов, но в данном случае это невозможно.) Но тем не менее, два выражения очень похожи. Как мы увидим, нельзя представлять пространство-время как реальную, обычную геометрию из-за этого различия в знаках. На самом деле, хотя мы не будем акцентировать внимание на этом, оказывается, что движущийся человек должен использовать систему

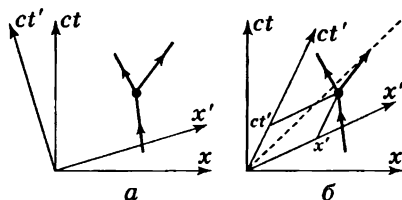


Рис. 5.2. Два изображения распада частицы: *a* — неверное, *б* — верное

осей, которые наклонены под одним и тем же углом к лучу света, и проектировать точку на эти оси при помощи отрезков, им параллельным, как показано на рис. 5.2, б. Мы не будем заниматься этой геометрией, поскольку она не особенно помогает, легче работать с уравнениями.

5.2. Пространственно-временные интервалы

Хотя геометрия пространства-времени не является геометрией Евклида в обычном смысле, эта геометрия очень похожа на нее, но имеет некоторые особенности. Если это представление о геометрии верно, то должны существовать такие функции координат и времени, которые не зависят от системы координат. Например, при обычном вращении, если мы возьмем две точки, одну для простоты в начале координат обеих систем, а другую где-то еще, то обе системы будут иметь одно и то же начало, и расстояние от одной точки до другой будет одинаковым в обеих системах. Это первое свойство точек, не зависящее от того, как мы производим измерение. Квадрат расстояния, или $x^2 + y^2 + z^2$, не меняется при поворотах. А в случае пространства-времени? Нетрудно показать, что здесь мы также имеем нечто, не зависящее от способа измерения, а именно комбинация $c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ одинакова до и после преобразования:

$$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2. \quad (5.3)$$

Эта величина, подобно расстоянию, «реальна» в некотором смысле; она называется *интервалом* между двумя точками пространства-времени, одна из которых в данном случае совпадает с началом координат. (В действительности это квадрат интервала, так же как $x^2 + y^2 + z^2$ — это квадрат расстояния.) Это название подчеркивает различие в геометрии, но любопытно, что здесь всего лишь поменялись некоторые знаки и появилось c .

Давайте избавимся от c ; эта величина излишняя, если мы хотим иметь удобное пространство, где x и y можно переставлять. Неопытный человек может внести путаницу, если будет измерять ширину по углу, под которым виден предмет, а глубину — по напряжению мышц при фокусировании глаз, в результате толщина окажется измеренной в метрах, а ширина — в радианах. Тогда возникнет сложная мешанина в уравнениях преобразований типа (5.2), и нельзя будет увидеть ясность и простоту

предмета из-за той простой технической причины, что одно и то же измеряется двумя разными единицами. Природа говорит нам в уравнениях (5.1) и (5.3), что время и пространство равнозначны; время стало пространством; *их следует измерять одними и теми же единицами*. Какое расстояние измеряет «секунда»? Это легко представить из (5.3). Это 3×10^8 метров, *расстояние, которое свет проходит за одну секунду*. Другими словами, если мы станем измерять все расстояния и времена в одних и тех же единицах (секундах), тогда наша единица длины будет равна 3×10^8 метров, и уравнения станут проще. С другой стороны, мы могли бы сделать нашу единицу равной времени, измеренному в метрах. Чему равен метр времени? Метр времени — это такое время, за которое свет проходит один метр, и, следовательно, это равно $\frac{1}{3} \times 10^{-8}$ секунд или 3,3 миллиардных долей секунды! Иначе говоря, нам надо записать все наши уравнения в системе единиц, в которой $c = 1$. Если время и пространство измеряются в одних и тех же единицах, тогда уравнения становятся явно проще. Они имеют вид

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2}},$$

$$y' = y, \tag{5.4}$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - ux}{\sqrt{1 - u^2}},$$

$$t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = t^2 - x^2 - y^2 - z^2. \tag{5.5}$$

Может быть, вы чувствуете себя неуверенно или «боитесь», что после того, как мы записали систему с $c = 1$, мы не сможем снова вернуться к нашим уравнениям. Напротив, гораздо легче запомнить их без c , и всегда несложно вернуть c на место, соблюдая размерность. Например, мы знаем, что в выражении $\sqrt{1 - u^2}$ из неименованного числа 1 приходится вычитать именованное, естественно, что мы должны разделить u^2 на c^2 , чтобы все выражение стало безразмерным.

Весьма интересно взглянуть на различие между пространством-временем и обычным пространством, на различие между

интервалом и расстоянием. Согласно формуле (5.5), если мы рассмотрим точку, которая в заданной системе координат имеет нулевое время и ненулевые пространственные координаты, то квадрат интервала окажется отрицательным, и мы получим мнимый интервал, квадратный корень из отрицательного числа. В этой теории интервалы могут быть как действительными, так и мнимыми. Квадрат интервала может быть либо положительным, либо отрицательным, в отличие от расстояния, квадрат которого положителен. Когда интервал мнимый, мы говорим, что две точки имеют между собой *пространственно-подобный интервал* (а не мнимый), потому что этот интервал больше похож на пространство, чем на время. С другой стороны, если два предмета находятся в одном и том же месте в данной системе координат в разные моменты времени, тогда квадрат времени положителен, расстояние равно нулю, и квадрат интервала положителен; этот интервал называется *времени-подобным*. Если провести на пространственно-временной диаграмме две прямые под углом 45° (в четырехмерном пространстве это будут «конусы», называемые световыми конусами), то все точки на этих прямых имеют нулевой интервал между ними и началом координат. Все точки, куда из данной точки попадает свет, отделены от нее нулевым интервалом, как мы видим из уравнения (5.5). Между прочим, мы только что доказали, что если свет движется со скоростью c в одной системе, то он движется со скоростью c и в другой системе, поскольку, если интервалы в обеих системах совпадают, т. е. нулевой интервал в одной системе соответствует нулевому интервалу в другой, тогда утверждение, что скорость распространения света постоянна, равносильно утверждению, что интервал равен нулю.

5.3. Прошедшее, настоящее и будущее

Пространственно-временная область, окружающая пространственно-временную точку, может быть разделена на три области, как показано на рис. 5.3. В одной области мы имеем пространственно-подобные интервалы, а в двух других — времени-подобные интервалы. Эти три области в физическом отношении связаны с точкой очень интересно. Физический объект или сигнал может попасть из некоторой точки области 2 в точку O , двигаясь со скоростью, меньшей скорости света. Поэтому со-

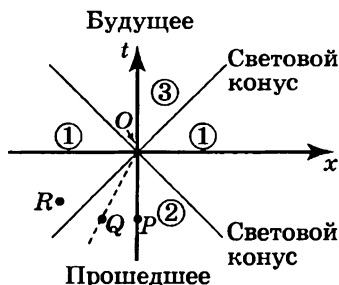


Рис. 5.3. Область пространства-времени, окружающая начало координат

бытия в этой области могут воздействовать на событие в точке O , могут влиять на него из прошлого ($t < 0$). Конечно же, предмет в точке P на отрицательной части оси t находится точно в «прошлом» по отношению к O ; P — это та же пространственно-временная точка, только в более раннее время. То, что произошло там тогда, влияет на точку O сейчас. (К сожалению, такая жизнь.) Другой предмет, в точке Q , может попасть в точку O , двигаясь с некоторой скоростью, меньшей c , так что если бы этот предмет был в космическом корабле и двигался, он, опять же, являлся бы прошлым для той же пространственно-временной точки. То есть в другой системе координат ось времени могла бы проходить через точки O и Q . Так что все точки в области 2 оказываются «прошлым» для точки O , и все, что случается в этой области, *может* повлиять на O . Поэтому область 2 иногда называют *влияющим прошлым*; это геометрическое место всех событий, которые каким-либо образом могут воздействовать на событие в точке O .

С другой стороны, область 3 — это область, на которую мы можем повлиять из точки O , мы можем «попасть» в точки этой области «пулями», летящими со скоростью, меньшей скорости света. Она представляет собой мир, на будущее которого мы можем повлиять, и мы можем назвать это *будущим, подверженным влиянию*. Остальное пространство-время (область 1) интересно тем, что ни мы не можем повлиять на нее из точки O , ни она не может повлиять на нас в настоящий момент в точке O , так как ничто не может двигаться быстрее скорости света. Конечно, то, что происходит в точке R , *может* повлиять на нас по-

же, то есть, если Солнце взорвется «прямо сейчас», мы узнаем об этом через восемь минут, и это событие не может повлиять на нас раньше этого времени.

То, что мы имеем в виду под словами «прямо сейчас», — это таинственная вещь, которая не поддается определению и на которую мы не можем повлиять, но которая может повлиять на нас позже, или на которую мы могли бы повлиять, если бы совершили нечто в достаточно далеком прошлом. Когда мы смотрим на звезду Альфа Центавра, мы видим ее такой, какой она была четыре года назад; мы могли бы захотеть понять, на что она похожа «сейчас». «Сейчас» означает в то же самое время в нашей специальной системе координат. Мы можем видеть Альфу Центавра благодаря свету, пришедшему из нашего прошлого, не менее четырех лет назад, но мы не знаем, что там происходит «сейчас»; пройдет четыре года, прежде чем то, что происходит там «сейчас», сможет повлиять на нас. «Альфа Центавра сейчас» — это идея или понятие нашего разума; мы не можем реально физически определить это в тот момент, потому что мы должны подождать, прежде чем «сейчас» удастся увидеть; мы не можем даже определить это прямо «сейчас». Более того, «сейчас» зависит от системы координат. Если бы, например, Альфа Центавра двигалась, наблюдатель там не соглашался бы с нами, он мог бы расположить свои оси под углом, и его «сейчас» было бы *другим* временем. Мы уже говорили о том, что одновременность не является уникальной вещью.

Существуют предсказатели или люди, которые утверждают, что могут предвидеть будущее, немало удивительных историй рассказывается и о людях, которые внезапно обнаруживают, что обладают знанием о будущем. С этим связано много парадоксов, ведь если мы знаем, что должно произойти, то мы можем избежать этого, совершив нужный поступок в нужное время, и так далее. Но не существует предсказателей, которые могли рассказать нам о *настоящем*! Никто не может сказать, что происходит именно сейчас достаточно далеко от нас, потому что это ненаблюдаемо.

Напоследок я задам вопрос, на который пусть попытаются ответить студенты: возник бы какой-либо парадокс, если бы внезапно появилась возможность знать о том, что происходит в пространственно-подобном интервале области 1?

5.4. Еще немного о 4-векторах

Давайте вернемся к рассмотрению аналогии между преобразованием Лоренца и вращением пространственных осей. Мы уже оценили пользу от собирания вместе величин, которые преобразуются так же, как и координаты, чтобы образовывать то, что мы называем *векторами* или направленными отрезками. При обычном вращении существует много величин, которые преобразуются точно так же, как x , y и z (например, скорость имеет три компоненты вдоль осей x , y и z); в разных системах координат эти компоненты преобразуются в разные значения. Однако, так или иначе, «сама» скорость обладает большей реальностью, чем любая из ее компонент, и мы изображаем ее направленным отрезком.

Поэтому мы задаем вопрос: существуют ли величины, которые преобразуются при переходе от подвижной системы к неподвижной системе таким же образом, как x , y , z и t ? Наш опыт обращения с векторами подсказывает, что три таких величины, подобно x , y и z , могут представлять три компоненты обычного пространственного вектора, а четвертая величина при пространственном вращении будет выглядеть как обычный скаляр: она не изменяется, пока мы не окажемся в движущейся системе координат. Возможно ли тогда связать с одним из известных нам трехмерных векторов четвертый объект (который мы будем называть временной компонентой) таким образом, чтобы все четыре объекта вместе «вращались» таким же образом, как координаты и время в пространстве-времени? Сейчас мы покажем, что существует по крайней мере одна такая четверка (фактически же их много): компоненты импульса и энергия как временная компонента преобразуются вместе, образуя то, что мы называем «4-вектором». При этом мы избавимся от с тем же приемом, какой использовали в уравнении (5.4). Энергия и масса, например, различаются только множителем c^2 , и при надлежащем выборе единиц измерения энергия совпадает с массой. Вместо того, чтобы записывать $E = mc^2$, мы пишем $E = m$, и тогда, если возникнут какие-то трудности, мы добавим нужное количество c , чтобы размерности совпадали в окончательном уравнении, а не в промежуточных.

Тогда наши уравнения для энергии и импульса таковы:

$$\begin{aligned} E &= m = m_0 / \sqrt{1 - v^2}, \\ \mathbf{p} &= m\mathbf{v} = m_0 \mathbf{v} / \sqrt{1 - v^2}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Значит, в наших единицах мы получим

$$E^2 - p^2 = m_0^2. \quad (5.7)$$

Например, если мы измеряем энергию в электронвольтах, то чему равна масса в 1 электронвольт? Она равна массе с энергией покоя 1 электронвольт, то есть $m_0 c^2 = 1$ эВ. Например, масса покоя электрона равна $0,511 \times 10^6$ эВ.

Как будут выглядеть импульс и энергия в новой системе координат? Чтобы узнать это, мы должны преобразовать уравнение (5.6), что мы вполне можем сделать, зная, как преобразуется скорость. Пусть некоторое тело имеет скорость v , но мы смотрим на него с точки зрения космического корабля, который сам движется со скоростью u , и в этой системе мы используем штрих для обозначения соответствующих величин. Сначала для простоты мы рассмотрим случай, когда скорость v совпадает по направлению с u . (Позже мы рассмотрим более общий случай.) Чему равна скорость v' , видимая с космического корабля? Эта скорость равна «разности» между v и u . Согласно закону, который мы получили ранее,

$$v' = \frac{v - u}{1 - uv}. \quad (5.8)$$

Теперь рассчитаем новую энергию E' , как ее видит наблюдатель на космическом корабле. Конечно, он будет использовать ту же массу покоя, но в качестве скорости возьмет v' . Нам осталось возвести v' в квадрат, вычесть результат из единицы, извлечь корень и взять обратную величину.

$$\begin{aligned} v'^2 &= \frac{v^2 - 2uv + u^2}{1 - 2uv + u^2 v^2}, \\ 1 - v'^2 &= \frac{1 - 2uv + u^2 v^2 - v^2 + 2uv - u^2}{1 - 2uv + u^2 v^2} = \end{aligned}$$

$$= \frac{1 - v^2 - u^2 + u^2 v^2}{1 - 2uv + u^2 v^2} = \frac{(1 - u^2)(1 - v^2)}{(1 - uv)^2}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v'^2}} = \frac{1 - uv}{\sqrt{1 - v^2} \sqrt{1 - u^2}}. \quad (5.9)$$

Энергия E' равна полученному выражению, умноженному на m_0 . Но мы хотим выразить энергию через нештрихованные энергию и импульс. Мы замечаем, что

$$E' = \frac{m_0 - m_0 uv}{\sqrt{1 - v^2} \sqrt{1 - u^2}} = \frac{(m_0 / \sqrt{1 - v^2}) - (m_0 v / \sqrt{1 - v^2}) u}{\sqrt{1 - u^2}},$$

или

$$E' = \frac{E - u p_x}{\sqrt{1 - u^2}}. \quad (5.10)$$

Мы узнаём в этом выражении знакомое нам преобразование

$$t' = \frac{t - ux}{\sqrt{1 - u^2}}.$$

Теперь надо найти новый импульс p'_x . Он равен энергии E' , умноженной на v' , и также просто выражается через E и p :

$$p'_x = E' v' = \frac{m_0(1 - uv)}{\sqrt{1 - v^2} \sqrt{1 - u^2}} \cdot \frac{v - u}{(1 - uv)} = \frac{m_0 v - m_0 u}{\sqrt{1 - v^2} \sqrt{1 - u^2}}.$$

Таким образом,

$$p'_x = \frac{p_x - uE}{\sqrt{1 - u^2}}, \quad (5.11)$$

и опять мы видим в этой формуле знакомое

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2}}.$$

Итак, выражения для новых значений энергии и импульса через старые значения точно такие же, как выражения для t' и x' через t и x ; все, что нам надо сделать, это — каждый раз, когда мы встречаем в (5.4) t , заменять его на E , а каждый раз, когда мы встречаем x , заменять его на p_x , и тогда уравнения (5.4) станут такими, как уравнения (5.10) и (5.11). Это правило подразумевает дополнительное равенство $p'_y = p_y$ и $p'_z = p_z$. Чтобы доказать это, надо посмотреть, как преобразуется движение вверх и вниз. Мы рассмотрели этот случай в прошлой главе. Мы проанализировали сложное столкновение и заметили, что поперечный импульс действительно не изменяется при переходе к движущейся системе; так что мы уже убедились, что $p'_y = p_y$ и $p'_z = p_z$. Тогда полная система уравнений для преобразований имеет вид:

$$\begin{aligned} p'_x &= \frac{p_x - uE}{\sqrt{1 - u^2}}, \\ p'_y &= p_y, \\ p'_z &= p_z, \\ E' &= \frac{E - up_x}{\sqrt{1 - u^2}}. \end{aligned} \tag{5.12}$$

Следовательно, мы обнаружили четыре величины, которые преобразуются подобно x , y , z и t , и которые мы называем *4-вектором импульса*. Поскольку импульс — это четырехмерный вектор, он может быть представлен на пространственно-временной диаграмме движущейся частицы как «стрелка», направленная по касательной к траектории, как показано на рис. 5.4. Эта стрелка имеет временную компоненту, дающую энергию, а пространственные компоненты представляют трехмерный вектор количества движения; эта стрелка более «реальна», чем

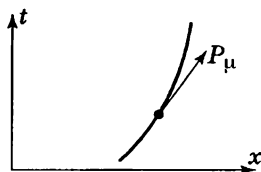


Рис. 5.4. 4-вектор импульса частицы

энергия или количество движения, поскольку они зависят от того, как мы смотрим на диаграмму.

5.5. Алгебра 4-векторов

Обозначения для 4-векторов отличаются от обозначений для 3-векторов. Например, 3-вектор импульса обозначают $\mathbf{p}$. Если мы хотим уточнить, то говорим о трех компонентах, p_x , p_y и p_z , либо просто обозначаем любую компоненту как p_i , полагая, что вместо i может стоять x , y или z . Обозначения, которые мы используем для 4-векторов, аналогичны этому: мы записываем такой вектор в виде p_μ , а μ означает *четыре* возможных направления — t , x , y или z .

Конечно, мы можем использовать любые обозначения, какие пожелаем. Не смейтесь над обозначениями, изобретайте их — это мощное средство. На самом деле математика — это в значительной степени изобретение обозначений. Вся идея 4-вектора — это, по сути, усовершенствование обозначений для лучшего запоминания преобразований. Итак, A_μ — это общий 4-вектор, p_μ — 4-импульс, p_t — энергия, p_x — импульс в направлении x , p_y — в направлении y и p_z — в направлении z . Чтобы сложить 4-векторы, мы складываем соответствующие компоненты.

Если имеется уравнение, связывающее 4-векторы, тогда это уравнение справедливо для *каждой компоненты*. Например, если при столкновении частиц должен выполняться закон сохранения 3-вектора импульса, то есть, если сумма импульсов для большого числа взаимодействующих или сталкивающихся частиц постоянна, то это означает, что сумма всех компонент импульсов в направлении x , в направлении y и в направлении z постоянна. Однако в таком виде этот закон в теории относительности был бы невозможен, потому что он *неполон*; это все равно, что говорить только о двух компонентах 3-вектора. Он неполон, потому что при повороте осей различные компоненты смешиваются, и мы должны включить в наш закон сохранения все три компоненты. Следовательно, в теории относительности мы должны дополнить закон сохранения импульса, добавив в него сохранение *временной* компоненты. Абсолютно необходимо, чтобы сохранение первых трех компонент сопровождалось сохранением чет-

вертой, иначе у нас не будет релятивистской инвариантности. Чтобы получить обоснованное 4-векторное соотношение в геометрии пространства-времени, вместе с сохранением импульса должно присутствовать четвертое уравнение — сохранение энергии. Таким образом, закон сохранения энергии и импульса в четырехмерных обозначениях имеет вид

$$\sum_{\substack{\text{входящие} \\ \text{частицы}}} p_{\mu} = \sum_{\substack{\text{выходящие} \\ \text{частицы}}} p_{\mu}, \quad (5.13)$$

или, в слегка измененных обозначениях,

$$\sum_i p_{i\mu} = \sum_j p_{j\mu}, \quad (5.14)$$

где $i=1, 2, \dots$ относится к сталкивающимся частицам, $j=1, 2, \dots$ относится к частицам, возникающим при столкновении, и $\mu = x, y, z$ или t . Вы спрашиваете: «В какой системе координат?» Это безразлично. Закон справедлив для любых компонент, в любой системе координат.

В векторном анализе мы обсуждали еще одно понятие — скалярное произведение двух векторов. Давайте рассмотрим, что соответствует ему в пространстве-времени. При обычном вращении неизменной остается величина $x^2 + y^2 + z^2$. В четырехмерном мире мы находим, что соответствующая величина равна $t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ (уравнение 5.3). Как это записать? Кто-то может захотеть изобразить нечто четырехмерное вроде A_{μ} и B_{μ} ; но обычно пишут:

$$\sum_{\mu} A_{\mu} A_{\mu} = A_t^2 - A_x^2 - A_y^2 - A_z^2. \quad (5.15)$$

Штрих у знака суммы означает, что первый «временной» член положителен, а остальные три имеют знак минус. Тогда эта величина одна и та же в любой системе координат, и мы можем называть ее квадратом длины 4-вектора. Например, чему равен квадрат длины 4-вектора импульса отдельной частицы? Он будет равен $p_t^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2$ или, иначе, $E^2 - p^2$, потому что мы знаем, что $p_t = E$. Что такое $E^2 - p^2$? Это должно быть что-то, что одинаково в любой системе координат. В частности, в системе координат, движущейся вместе с частицей, в которой частица покоится. Если частица неподвижна, то у нее нет импульса. Поз-

тому у нее остается только энергия, совпадающая с массой. Следовательно, $E^2 - p^2 = m_0^2$. Таким образом, мы видим, что квадрат длины 4-вектора импульса равен m_0^2 .

Пользуясь выражением для квадрата вектора, мы можем изобрести скалярное произведение двух 4-векторов: если a_μ и b_μ — два 4-вектора, то их скалярное произведение равно

$$\sum' a_\mu b_\mu = a_t b_t - a_x b_x - a_y b_y - a_z b_z. \quad (5.16)$$

Оно сохраняет свое значение при преобразовании системы координат.

Наконец, упомянем о частицах, у которых масса покоя m_0 равна нулю. Например, фотон — частица света. Фотон похож на частицу тем, что он несет энергию и импульс. Энергия фотона равна некоторой постоянной (постоянной Планка), умноженной на частоту фотона: $E = \hbar\nu$. Такой фотон несет также импульс, который (как у всякой частицы) равен постоянной Планка, деленной на длину волны: $p = \hbar/\lambda$. Но для фотона существует определенное соотношение между частотой и длиной волны: $\nu = c/\lambda$. (Число волн в секунду, умноженное на длину волны, является расстоянием, которое свет проходит за одну секунду, что, естественно, равно c .) Таким образом, мы сразу видим, что энергия фотона равна импульсу, умноженному на c , или, если $c = 1$, *энергия и импульс равны*. Это равносильно тому, что масса покоя равна нулю. Взглянем на это еще раз, это весьма любопытно. Если фотон — частица с нулевой массой покоя, что произойдет, когда он остановится? *Он никогда не остановится!* Он всегда движется со скоростью c . Обычная формула для энергии — это $m_0/\sqrt{1-v^2}$. Можем ли мы утверждать, что при $m_0 = 0$ и $v = 1$ энергия фотона равна нулю? Мы *не можем* сказать, что она равна нулю; фотон может обладать (и обладает) энергией, хотя и не имеет массы покоя, но это происходит благодаря его постоянному движению со скоростью света!

Мы знаем также, что импульс любой частицы равен произведению полной энергии на скорость: если $c = 1$, то $p = vE$, или, в обычных единицах, $p = vE/c^2$. Для любой частицы, движущейся со скоростью света, $p = E$, если $c = 1$. Формулы для энергии фотона с точки зрения движущейся системы задаются, конечно, уравнениями (5.12), но вместо импульса мы должны подставить

энергию, умноженную на c (или на 1 в данном случае). Изменение энергии после преобразования означает изменение частоты. Это называется эффектом Доплера, и его можно легко рассчитать из уравнения (5.12), положив $E = p$ и $E = \hbar\nu$.

Как сказал Минковский, «пространство само по себе и время само по себе погрузятся в реку забвения, и только своеобразный союз между ними останется жить».



6

Искривленное пространство

6.1. Искривленное пространство двух измерений

Согласно Ньютону, всё притягивает к себе всё остальное с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, и объекты реагируют на эти воздействия, приобретая ускорения, пропорциональные силам. Таковы законы Ньютона всеобщего тяготения и движения. Как вам известно, эти законы определяют движение мячей, планет, спутников, галактик и так далее.

Эйнштейн иначе интерпретировал закон тяготения: пространство и время — которые нужно объединить в пространство-время — *искривлены* вблизи тяжелых масс. А стремление объектов двигаться вдоль «прямых линий» в этом искривленном пространстве-времени заставляет их двигаться так, как они это делают. Это сложная идея — очень сложная. Именно ее мы хотим объяснить в этой главе.

Наш вопрос состоит из трех частей. Первая касается эффекта тяготения, вторая — идей пространства-времени, которые мы уже изучали, а третья — идеи искривленного пространства. Упростим нашу задачу: вначале не будем трогать тяготение и оставим в покое время — будем обсуждать только искривленное пространство. Позже мы поговорим и о других частях, но сейчас сконцентрируемся на идее искривленного пространства — что понимается под искривленным пространством и, в особенности, в эйнштейновском применении. Но даже только эта часть будет довольно трудна в трехмерном пространстве. Поэтому для начала упростим задачу еще больше и поговорим о том, что означают слова «искривленное пространство» двух измерений.

Чтобы понять идею искривленного двумерного пространства, надо представить себе ограниченный кругозор существа, живу-

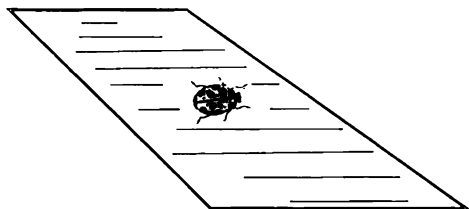


Рис. 6.1. Жук на плоской поверхности

щего в таком пространстве. Вообразим себе слепого жука, который живет на плоскости, как показано на рис. 6.1. Он может передвигаться только по этой плоскости и не может узнать что-либо о существовании «внешнего мира». (Он не обладает воображением.) Попробуем применить аналогию. Мы живем в трехмерном мире и не обладаем воображением для того, чтобы выйти за пределы нашего трехмерного мира в каком-то новом направлении; поэтому прибегнем к аналогии. В некотором смысле мы похожи на жука, живущего на плоскости и не предполагающего о существовании пространства в другом направлении.

В качестве другого примера жука, живущего в двух измерениях, представим себе жука на сфере. Предположим, что он может передвигаться по поверхности сферы, как на рис. 6.2, но не может взглянуть ни «вверх», ни «вниз», ни «наружу».

Теперь давайте рассмотрим третью разновидность существа. Это тоже жук, как и предыдущие два, и тоже живет на плоскости, как первый жук, но на этот раз плоскость необычная. В разных местах плоскости температура различна. Более того, измерительные линейки, которые он может использовать, сделаны из материала, который при нагревании расширяется. Когда наш жук прикладывает линейку для измерения в каком-ли-

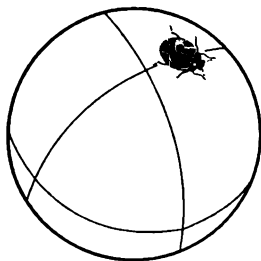


Рис. 6.2. Жук на сфере

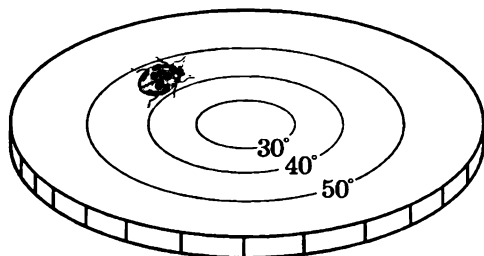


Рис. 6.3. Жук на горячей тарелке

бо месте, линейка сразу же удлинится до такой величины, которая соответствует температуре данного места. Какой бы объект ни взял жук — себя самого, линейку, треугольник, что угодно — всё подвержено температурному расширению. Любой предмет длиннее в горячих местах, чем в холодных, и все предметы имеют одинаковый коэффициент расширения. Назовем среду обитания нашего третьего жука «горячей тарелкой», хотя это специфический вид горячей тарелки: холодная в центре и все более горячая к краям (рис. 6.3).

Теперь представим себе, что наши жуки начинают изучать геометрию. Хотя мы и полагаем, что они слепы и не видят «внешнего» мира, но они могут сделать многое своими лапками и усиками: проводить линию, брать линейку и измерять длину. Давайте предположим, что они начали с простейшей задачи в геометрии. Они учатся проводить прямую линию, определенную как кратчайшее расстояние между двумя точками. Наш первый жук (см. рис. 6.4) умеет проводить очень хорошую прямую линию. А что делает жук на сфере? Он рисует прямую как кратчайшее расстояние — для него — между двумя точками, как показано на рис. 6.5. Для нас она выглядит кривой, но он не может покинуть сферу и считает, что это «действительно»

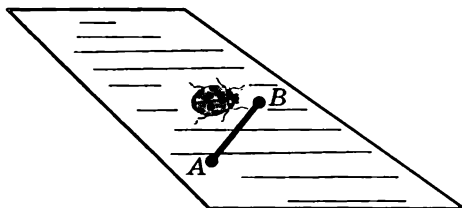


Рис. 6.4. «Прямая линия» на плоскости

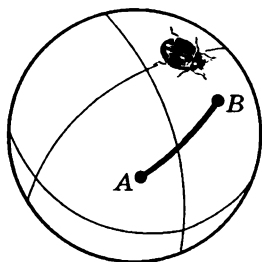


Рис. 6.5. «Прямая линия» на сфере

кратчайшее расстояние. Он только знает, что любой другой путь *в его мире* всегда длиннее, чем эта его прямая линия. Так что позволим ему иметь свою прямую линию как кратчайшую дугу между двумя точками. (Естественно, это дуга большого круга.)

Наконец, наш третий жук — тот, что на рис. 6.3 — тоже рисует «прямую линию», которая нам кажется кривой. Например, кратчайшее расстояние между точками A и B на рис. 6.6 будет похоже на изображенную кривую. Почему? Потому что когда линия проходит через более теплые участки «горячей тарелки», линейка становится длиннее (с нашей всевидящей точки зрения), и требуется отложить меньшее число мерных отрезков, чтобы попасть из A в B. Так что для него линия оказывается прямой — он не может представить себе, что кто-то может существовать в странном трехмерном мире и называть «прямой» совсем другую линию.

Надо полагать, вы уже поняли, что весь остальной анализ будет проводиться с точки зрения существ, обитающих на разных поверхностях, а не с *нашей* точки зрения. Учитывая это, давайте посмотрим, на что похожа остальная геометрия наших жу-

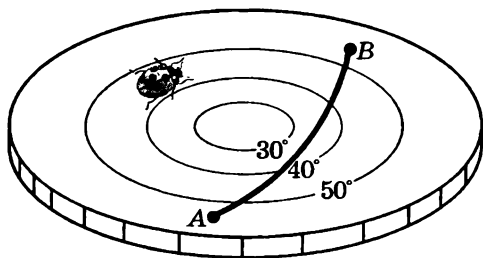


Рис. 6.6. «Прямая линия» на горячей тарелке

ков. Будем считать, что все жуки научились проводить перпендикуляр к прямой. (Можете догадываться, как они это делают.) Наш первый жук (тот, что на нормальной плоскости) делает это очень интересно. Он начинает в точке A и проводит прямую длиной 100 см, затем поворачивает под прямым углом и отмечает следующие 100 см, затем снова поворачивает под прямым углом и проводит еще 100 см, затем в третий раз поворачивает под прямым углом и проводит четвертую прямую длиной 100 см. В результате он оказывается в начальной точке, как показано на рис. 6.7, a . Это свойство его мира — один из законов его «геометрии».

Затем он обнаруживает еще одну интересную вещь. Если он нарисует треугольник — фигуру, образованную тремя прямыми линиями — то сумма углов равна 180° , то есть сумме двух прямых углов (см. рис. 6.7, b).

Затем он изобретает окружность. Что такое окружность? Окружность получается следующим способом: вы проводите прямые линии из одной точки в самых разных направлениях, и отмечаете точки, лежащие на одинаковом расстоянии от исходной (см. рис. 6.7, $в$). (Нам следует быть аккуратными при определении всех этих фигур, поскольку мы должны иметь возможность проанализировать действия остальных приятелей.) Конечно, это равнозначно кривой, которую можно получить, вращая линейку вокруг некоторой точки. Наш жук таким образом научился рисовать окружность. Потом он задумывается об измерении длины окружности. Он измеряет несколько окружностей и обнаруживает некоторую закономерность. Длина окружности всегда равна одному и тому же числу, умноженно-

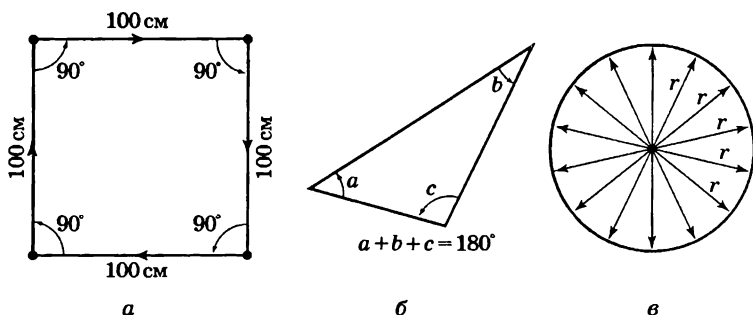


Рис. 6.7. Квадрат, треугольник и окружность в плоском пространстве

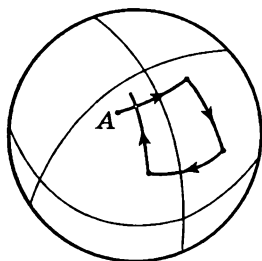


Рис. 6.8. Попытка построить «квадрат» на сфере

му на радиус (который, конечно же, является расстоянием от центра до этой кривой). Длина окружности и радиус всегда имеют одно и то же отношение — примерно 6,283, — независимо от размера окружности.

Теперь посмотрим, как другие жуки строят *свои* геометрические фигуры. Что произойдет с жуком на сфере, когда он попытается построить «квадрат»? Если он будет действовать так, как мы изложили выше, то скорее всего решит, что результат вряд ли стоит затраченных усилий. Он получит фигуру вроде той, что изображена на рис. 6.8. Точка, где он завершит свою работу, не совпадает с точкой А. У него вообще не получится никакая замкнутая кривая. Возьмите сферу и попробуйте. Нечто подобное получится и с нашим другом на горячей тарелке. Если он отложит четыре прямолинейных отрезка, проводя измерения с помощью своей расширяющейся линейки под прямыми углами, то получит картину вроде изображенной на рис. 6.9.

Теперь предположим, что у каждого из наших жуков есть свой собственный Евклид, который объясняет им, какой «должна» быть геометрия, и чтобы они убедились в его правоте, проводит приблизительные измерения на *малых* расстояниях. Од-

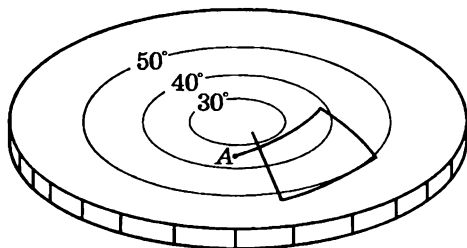


Рис. 6.9. Попытка построить «квадрат» на горячей тарелке

нако когда они попытаются построить точные квадраты большого размера, то обнаружат, что что-то не так. Дело в том, что с помощью одних только *геометрических построений* они смогут обнаружить, что дело заключается в их пространстве. Мы определяем *искривленное пространство* как пространство, геометрия которого отличается от геометрии плоскости. Геометрия жуков на сфере или на горячей тарелке — это геометрия искривленного пространства. Здесь правила геометрии Евклида не действуют. И вам вовсе не обязательно иметь возможность подниматься над плоскостью, чтобы понять, что вы живете в искривленном мире. Во все не обязательно облетать Землю, чтобы понять, что она является шаром. Можно обнаружить, что вы живете на шаре, построив квадрат. Если квадрат очень мал, то измерения должны проводиться с большой точностью, но если он велик, то можно провести и более грубые измерения.

Давайте рассмотрим треугольник на плоскости. Сумма его углов равна 180° . Наш приятель на сфере решит, что треугольники — очень странные фигуры. Он может, например, построить треугольник с *тремя прямыми углами*. В самом деле! Один из таких треугольников показан на рис. 6.10. Предположим, что наш жук начинает на северном полюсе и проводит прямую линию вплоть до экватора, Затем он поворачивает на 90° и проводит еще одну прямую линию такой же длины. Потом повторяет это еще раз. Из-за того, что он выбрал именно такую длину, он окажется в первоначальной точке и получит пересечение с первой линией под прямым углом. Поэтому нет никакого сомнения в том, что его треугольник имеет три прямых угла, что дает в сумме 270 градусов. Оказывается, что для него сумма углов треугольника *всегда* больше 180 градусов. На самом деле избыток (в рассмотренном случае равный 90°) пропорционален

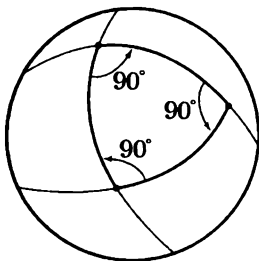


Рис. 6.10. На сфере «треугольник» может иметь три прямых угла

площади треугольника. Если треугольник на сфере очень мал, сумма его углов близка к 180° , незначительно превосходя эту величину. По мере увеличения треугольника расхождение увеличивается. Жук на горячей тарелке обнаружит аналогичные трудности со своими треугольниками.

Теперь посмотрим, как у наших жуков обстоят дела с окружностями. Они рисуют окружности и определяют их длину. Так, жук на сфере рисует окружность, как показано на рис. 6.11. Он определяет, что ее длина *меньше*, чем радиус, умноженный на 2π . (Вы можете увидеть это, поскольку с высоты нашего трехмерного обзора видно, что кривая, которую он называет «радиусом», *длиннее* истинного радиуса окружности.) Предположим, что жук на сфере прочел Евклида и решил предсказать величину радиуса, разделив длину окружности на 2π , при этом он получит

$$r_{\text{пред}} = \frac{C}{2\pi}. \quad (6.1)$$

Он обнаруживает, что измеренный радиус больше предсказанного. Действуя дальше, он может определить величину «избытка радиуса», написать

$$r_{\text{изм}} - r_{\text{пред}} = r_{\text{изб}} \quad (6.2)$$

и исследовать, как избыток радиуса зависит от размера окружности.

Жук на горячей тарелке обнаруживает похожее явление. Пусть ему надо нарисовать окружность с центром в холодной точке на тарелке, как показано на рис. 6.12. Если мы понаблюдаем за ним, то заметим, что его линейка короче возле центра и

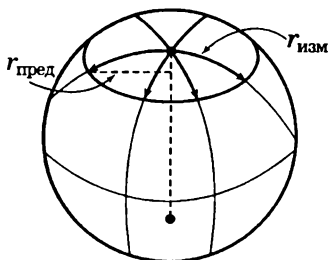


Рис. 6.11. Окружность на сфере

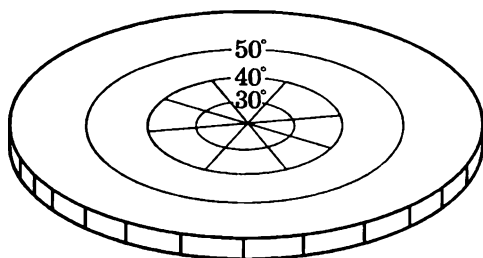


Рис. 6.12. Построение окружности на горячей тарелке

длиннее при перемещении к краям (хотя сам жук этого, конечно, не знает). Когда он измеряет длину окружности, линейка остается все время длинной, так что он тоже скоро выяснит, что измеренный радиус больше предсказанного ($C/2\pi$). Итак, жук на горячей тарелке тоже столкнулся с «эффектом избытка радиуса». И снова величина эффекта зависит от радиуса окружности.

Можно определить «искривленное пространство» как такое, в котором имеются следующие нарушения геометрии: сумма углов треугольника отличается от 180 градусов; длина окружности, деленная на 2π , не равна радиусу; правило для построения квадрата не дает замкнутую фигуру. Вы можете подумать о других нарушениях.

Мы привели два различных примера искривленного пространства: сфера и горячая тарелка. Но любопытно, что если выбрать правильную зависимость температуры на горячей тарелке от расстояния, две этих геометрии окажутся одинаковыми. Мы можем заставить жука на горячей тарелке получать точно такие же результаты, какие получает жук на сфере. Для тех, кто любит геометрию и геометрические задачи, мы подскажем, как это можно сделать. Предположим, что длина линейки (зависящая от температуры) пропорциональна единице плюс константа, умноженной на квадрат расстояния от центра, тогда окажется, что геометрия горячей тарелки в точности такая же, как геометрия сферы. Конечно, существуют и другие геометрии. Мы могли бы поинтересоваться геометрией жука, обитающего на груше, то есть на чем-то, имеющем большую кривизну

* за исключением бесконечно удаленной точки.

в одном месте и меньшую — в другом, где избыток углов в треугольнике будет заметнее, когда он строит маленькие треугольники в одном месте, чем когда он делает это в другом месте. Другими словами, кривизна пространства может меняться от одной точки к другой. Это является обобщением идеи и может быть промоделировано подходящим распределением температуры на горячей тарелке.

Следует обратить внимание на то, что можно получить совершенно противоположный результат для расхождений. Вы можете, например, обнаружить, что все треугольники, если они достаточно велики, имеют сумму углов *меньше* 180 градусов. Это может показаться странным, но это так. Такой результат мы можем получить на горячей тарелке, где температура уменьшается с удалением от центра. Здесь все эффекты окажутся перевернутыми. Но мы можем получить такой же результат и чисто геометрически, рассмотрев двумерную геометрию на поверхности седла. Представьте себе седлообразную поверхность вроде той, что схематично изображена на рис. 6.13. Если нарисовать на этой поверхности «окружность», определить геометрическое место точек, расположенных на равном расстоянии от центра, то эта окружность представит собой кривую, изгибающуюся вверх и вниз подобно раковине моллюска. Поэтому ее длина окажется больше, чем можно было бы ожидать, вычисляя $2\pi r$. Так что на этот раз $C/2\pi$ меньше r . «Избыток радиуса» оказывается отрицательным.

Сферы, груши и другие подобные поверхности являются поверхностями *положительной* кривизны; а остальные поверхности называют поверхностями *отрицательной* кривизны. Вообще говоря, двумерный мир может иметь кривизну, которая меняется от точки к точке и может быть положительной в одних местах и отрицательной в других. В общем под искривлен-

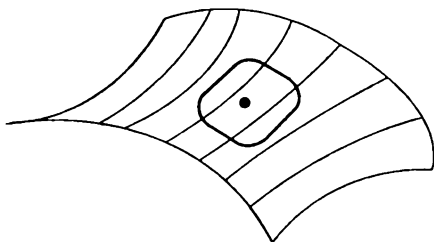


Рис. 6.13. «Окружность» на седлообразной поверхности

ным пространством мы понимаем такое пространство, в котором нарушается евклидова геометрия, при этом расхождения могут быть как положительными, так и отрицательными. Величина кривизны — определенная, например, как избыток радиуса — может изменяться от одной точки к другой.

Обратите внимание на то, что при нашем определении кривизны цилиндр, что удивительно, не является искривленной поверхностью. Если жук обитает на поверхности цилиндра, как показано на рис. 6.14, то он обнаружит, что треугольники, квадраты и окружности ведут себя точно так же, как на плоскости. Это легко увидеть, представив себе, как все эти фигуры будут выглядеть, если поверхность цилиндра развернуть на плоскости. Тогда все геометрические фигуры можно точно совместить с аналогичными фигурами на плоскости. У жука, обитающего на цилиндре, нет возможности определить, что его пространство искривлено (при условии, что он не совершает обход вокруг цилиндра, а производит локальные измерения). В нашем техническом смысле мы считаем, что его пространство *не* искривлено. То, о чем мы поговорим, более точно называется *внутренней* кривизной; то есть кривизной, которая может быть найдена с помощью локальных измерений. (Цилиндр не обладает внутренней кривизной.) Именно эту кривизну имел в виду Эйнштейн, говоря о том, что наше пространство искривлено.

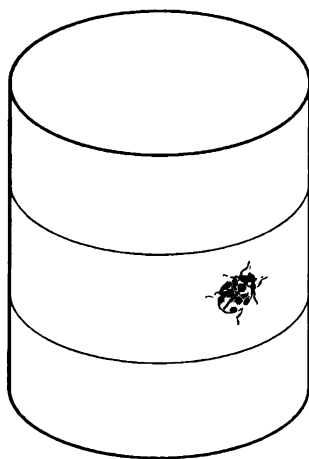


Рис. 6.14. Двумерное пространство с нулевой внутренней кривизной

Однако пока мы рассмотрели кривизну только для двумерного случая; надо двигаться дальше и разобраться, что означает это понятие в случае трех измерений.

6.2. Кривизна в трехмерном пространстве

Мы живем в трехмерном пространстве и собираемся рассмотреть идею об искривленности нашего пространства. Вы скажете: «Но как можно представить, что оно искривлено в каком-нибудь направлении?» Да, мы не можем этого представить из-за ограниченности нашего воображения. (Возможно, это и к лучшему, что мы не можем дать чрезмерную волю воображению, так как благодаря этому мы не слишком отрываемся от реального мира.) Но мы все-таки можем *определить* кривизну, не выходя за пределы нашего трехмерного мира. Все, что мы говорили о двух измерениях, было просто упражнением для того, чтобы показать, как получить определение кривизны, не предполагая взгляда со стороны.

Мы можем определить, является наш мир искривленным или нет, тем же способом, который использовали джентльмены, обитающие на сфере и на горячей тарелке. Мы не можем различить эти два случая, но мы определенно можем обнаружить отличие этих случаев от плоского пространства, от простой плоскости. Как? Довольно просто. Мы строим треугольник и измеряем его углы. Или же строим большую окружность и измеряем ее длину и радиус. Или пытаемся построить точный квадрат либо куб. В каждом случае мы проверяем, работают ли законы геометрии. Если они не работают, мы говорим, что наше пространство искривлено. Если мы построили большой треугольник и сумма его углов превосходит 180 градусов, мы можем утверждать, что наше пространство искривлено. Или же, если измеренный радиус окружности не равен ее длине, деленной на 2π , мы можем также говорить, что наше пространство искривлено.

Заметим, что в трехмерном пространстве ситуация может оказаться значительно сложнее, чем в двумерном. В любой точке двумерного пространства существует определенное значение кривизны. Но при трех измерениях кривизна может иметь *несколько компонент*. Если мы построим треугольник в некоторой плоскости, то можем получить иной ответ по сравнению

с тем, когда плоскость треугольника ориентирована по-другому. Или возьмем пример окружности. Предположим, что мы построили окружность, измерили ее радиус, и он не совпал с величиной $C/2\pi$, при этом имеется некоторый избыток радиуса. Теперь строим другую окружность, под прямым углом к первой, как на рис. 6.15. Вовсе не обязательно, что избыток для обеих окружностей окажется одинаковым. На самом деле, для первой окружности может иметь место положительный избыток, а для второй — отрицательный избыток.

Возможно, следует обдумать идею получше: не можем ли мы обойти все эти компоненты, используя трехмерную *сферу*? Сферу можно получить, беря точки, находящиеся на одном и том же расстоянии от заданной точки пространства. Затем мы можем измерить площадь поверхности, построив прямоугольную сетку мелкого масштаба и суммируя все кусочки площади. Согласно Евклиду общая площадь A должна равняться квадрату радиуса, умноженному на 4π ; так что можно определить «предсказанный радиус» как $\sqrt{A/4\pi}$. Но мы можем также найти радиус, если выроем яму до центра и измерим пройденное расстояние. Как и прежде, мы можем вычесть из измеренного радиуса предсказанный и назвать эту разность избытком радиуса:

$$r_{\text{изб}} = r_{\text{изм}} - \left(\frac{\text{измеренная площадь}}{4\pi} \right)^{1/2},$$

который может служить приемлемой мерой кривизны.

Большим преимуществом в данном случае является то, что результат не зависит от ориентации, как в случае треугольника или окружности.

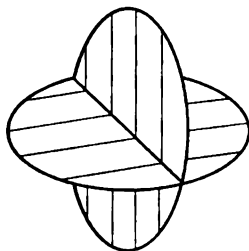


Рис. 6.15. Избыток радиуса может быть различным для окружностей различной ориентации

Избыток радиуса сферы обладает и некоторым неудобством; он не полностью характеризует пространство. Он дает некоторую *среднюю кривизну* трехмерного мира, поскольку усредняет значение различных искривлений. Однако поскольку эта величина — средняя, она не полностью решает задачу определения геометрии. Если вам известно только это число, вы не можете предсказать все свойства геометрии пространства, поскольку невозможно сказать, что произойдет с окружностями в различных ориентациях. Полное определение требует знания шести «параметров кривизны» в каждой точке. Конечно, математики знают, как получить все эти числа. Вы можете когда-нибудь прочесть в одной из математических книг, как записать их в точной и изящной форме, но сначала неплохо составить хотя бы грубое представление о предмете. Для большинства наших целей вполне достаточно средней кривизны*.

6.3. Наше пространство искривлено

Теперь подошла очередь главного вопроса. Является ли искривленным реальное физическое пространство, в котором мы живем? Если нам хватает воображения, чтобы осознать возможность искривления пространства, то интересно узнать, является ли реальный мир искривленным или нет. Для выяснения этого люди начинают проводить прямые геометрические измерения и не находят никаких отклонений. С другой стороны, исследуя тяготение, Эйнштейн обнаружил, что пространство является искривленным, и мы хотели бы рассказать вам, что Эйнштейновский закон говорит о величине кривизны и как Эйнштейн получил этот результат.

Эйнштейн заявлял, что пространство искривлено и что источником кривизны является вещество. (Вещество является также источником тяготения, так что тяготение связано с кри-

* Для полноты следует сделать одно дополнительное замечание. Если вы захотите перенести модель искривления пространства по типу горячей тарелки на три измерения, то должны учесть, что длина линейки теперь зависит не только от того, куда вы ее прикладываете, но и от того, какова при этом ее ориентация. Это обобщение простого случая, при котором длина линейки зависит от места ее приложения, но остается той же самой при направлении линейки на северо-восток, на юго-запад или сверху вниз. Это обобщение необходимо, если вы хотите применить такую модель к трехмерному пространству с произвольной геометрией, и не требуется в случае двух измерений.

визной — но об этом в данной главе речь пойдет позже.) Давайте предположим для простоты, что вещество распределено непрерывно с некоторой плотностью, которая, однако, может меняться от одной точки к другой по произвольному закону*. Определение, которое дал Эйнштейн кривизне, таково: если имеется область пространства, содержащая вещество, и мы возьмем сферу, достаточно малую для того, чтобы плотность вещества ρ внутри нее была практически постоянной, тогда *избыток радиуса* для этой сферы пропорционален массе, заключенной внутри нее. Используя определение для избытка радиуса, получим

$$\text{Избыток радиуса} = \sqrt{\frac{A}{4\pi}} - r_{\text{изм}} = \frac{G}{3c^2} \cdot M. \quad (6.3)$$

Здесь G обозначает постоянную сил тяготения (из теории Ньютона), c — это скорость света, а $M = 4\pi r^3/3$ — масса вещества внутри сферы. Таков закон Эйнштейна для средней кривизны пространства.

Возьмем для примера Землю и забудем, что ее плотность меняется от точки к точке — чтобы нам не пришлось брать интегралы. Предположим, что мы точно измерили поверхность Земли, а затем прорыли шахту до центра и измерили радиус. Зная площадь поверхности, мы можем рассчитать предсказанный радиус, приравняв площадь к $4\pi r^2$. Сравнив предсказанный радиус с действительным, мы найдем, что действительный радиус превосходит предсказанный на величину, задаваемую уравнением (6.3). Постоянная $G/3c^2$ равна примерно $2,5 \times 10^{-29}$ см на грамм, так что для каждого грамма материи измеренный радиус превосходит предсказанный на $2,5 \times 10^{-29}$ см. Учитывая массу Земли, равную примерно 6×10^{27} г, получим, что радиус Земли на 1,5 миллиметра больше значения, получаемого расчетом из площади ее поверхности**. Прodelав такие же вычисления для Солнца, вы найдете, что радиус Солнца длиннее на полтора километра.

Следует заметить, что согласно этому закону *средняя* кривизна *над* поверхностью Земли равна нулю. Но это *не* означает, что

* Никто, в том числе и сам Эйнштейн, не знает, как это сделать, если масса сосредоточена в точках.

** Приблизительно, поскольку плотность не является независимой от величины радиуса, как мы предположили.

все компоненты кривизны равны нулю. Может существовать — и фактически существует — некоторая кривизна над Землей. Для окружности на плоскости избыток радиуса будет иметь один знак при одной ориентации и противоположный знак при другой ориентации. Оказывается, что среднее значение кривизны над сферой равно нулю, когда *внутри* нее нет массы. Между прочим, существует связь между различными компонентами кривизны и *изменением* среднего значения кривизны от точки к точке. Поэтому, если известна средняя кривизна во всех точках, вы можете определить кривизну в каждой точке. Средняя кривизна над Землей меняется с высотой, так что пространство искривлено. И именно эту кривизну мы воспринимаем как силу гравитации.

Предположим, что имеется жук на плоскости, которая покрыта бугорками. Передвигаясь по этой плоскости, жук придет к выводу, что там, где расположен бугорок, имеет место локальное искривление его пространства. То же самое наблюдается в трех измерениях. Всюду, где находится сгусток вещества, наше трехмерное пространство имеет локальное искривление — что-то вроде трехмерного бугорка.

Если мы создадим на поверхности ряд выпуклостей, то может появиться общая кривизна помимо всех бугорков — поверхность может стать похожей на шар. Было бы интересно узнать, имеет ли наше пространство чистую среднюю кривизну, также как и локальные бугорки, вызванные сгустками вещества вроде Земли и Солнца. Астрофизики пытались ответить на этот вопрос, проводя измерения галактик, удаленных на большие расстояния. Например, если число галактик, которые мы видим внутри сферы большого размера, отличается от того, что мы ожидаем увидеть, зная радиус этой сферы, мы можем измерить избыток радиуса для этой большой сферы. С помощью таких измерений предполагают выяснить, является ли вся наша Вселенная в среднем плоской или круглой — «замкнута» ли она как сфера или «открыта» как плоскость. Возможно, вы слышали о спорах, которые идут по этому поводу. Они происходят потому, что астрономические измерения пока не достоверны; экспериментальные данные также недостаточно точны, чтобы дать определенный ответ. К сожалению, у нас нет ни малейшего представления об общей кривизне нашей Вселенной в большом масштабе.

6.4. Геометрия в пространстве-времени

Теперь нам необходимо поговорить о времени. Как вам известно из специальной теории относительности, измерения пространства и измерения времени взаимосвязаны. Было бы безумием представить себе, что с пространством что-то произошло, а с временем при этом ничего не случилось. Вспомните, что измерение времени зависит от скорости, с которой вы движетесь. Например, если мы наблюдаем за человеком в космическом корабле, то видим, что для него все происходит медленнее, чем для нас. Пускай он отправился в полет и вернулся из него через 100 секунд *по нашим часам*; его часы показывают, что он отсутствовал только 95 секунд. По сравнению с нашими его часы — и все прочие процессы, вроде его сердцебиения — протекают медленнее.

Теперь рассмотрим интересную задачу. Предположим, что это вы находитесь в космическом корабле. Мы просим вас стартовать по сигналу и вернуться обратно также по сигналу — скажем, точно через 100 секунд согласно *нашим* часам. Вас просят также, чтобы вы совершили свой полет таким образом, чтобы *ваши* часы показали *наибольшее* время полета. Как вам следует двигаться? Вы должны оставаться неподвижным. Если вы сдвинетесь с места, ваши часы к моменту возвращения будут показывать меньше 100 секунд.

Однако давайте немного изменим задачу. Предположим, что мы просим вас стартовать в точке А по данному сигналу и отправиться к точке В (обе точки зафиксированы относительно нас), причем сделать это так, чтобы вернуться назад точно в момент подачи второго сигнала (скажем, через 100 секунд согласно нашим неподвижным часам). И снова вас просят совершать полет таким образом, чтобы в момент прибытия ваши часы показывали максимальное время. Как вам следует поступить? На какой траектории и при какой временной схеме ваши часы покажут максимальное прошедшее время в момент возвращения? Ответ ясен: вы совершите самое долгое путешествие (с *вашей* точки зрения), если будете двигаться прямолинейно с постоянной скоростью. Причина этого нам известна: любое удлинение пути и любое превышение скорости заставят ваши часы идти медленнее. (Поскольку отклонение времени зависит от квадрата скорости, то время, которое вы теряете при ускорении на одном участке, нельзя компенсировать замедлением на другом участке.)

Суть всего этого состоит в том, что мы можем применить эту идею для определения «прямой линии» в пространстве-времени. Аналогом прямой линии в пространстве для пространства-времени является *движение* в постоянном направлении с постоянной скоростью.

Кривая кратчайшего расстояния в пространстве соответствует в пространстве-времени не траектории кратчайшего времени, а траектории *наибольшего* времени, из-за тех странностей, что происходят в теории относительности со знаком члена, содержащего t . «Прямолинейное» движение — аналог «постоянной скорости вдоль прямой линии» — это такое движение, которое переносит часы из одного места в один момент времени в другое место в другой момент времени таким образом, чтобы эти часы показали наибольшее время движения. Это и будет нашим определением аналога прямой линии в пространстве-времени.

6.5. Сила притяжения и принцип эквивалентности

Теперь мы готовы обсуждать законы тяготения. Эйнштейн пытался создать теорию тяготения, которая согласовывалась бы с разработанной им ранее теорией относительности. Он приложил много усилий, пока не нашел один важный принцип, позволивший ему найти правильные законы. Этот принцип основан на идее, что при свободном падении какого-либо тела всё, находящееся внутри него, оказывается в невесомости. Например, спутник на орбите находится в свободном падении под действием земного притяжения, и находящийся в нем астронавт ощущает себя невесомым. Эта мысль, сформулированная более точно, *называется принципом эквивалентности Эйнштейна*. Это связано с тем, что все объекты падают с одним и тем же ускорением, независимо от их массы и от вещества, из которого они сделаны. Если космический корабль находится в свободном падении, и внутри него находится человек, то законы, управляющие падением человека и корабля, одни и те же. Поэтому, если человек забрался внутрь корабля, то он и остается там. Он не падает *относительно корабля*. Именно это мы имеем в виду, когда говорим о «невесомости».

Теперь предположим, что вы находитесь в космическом корабле, который ускоряется. Ускоряется относительно чего? Давайте будем просто говорить, что включены двигатели корабля, создающие тягу, так что корабль уже не находится в свободном

падении. Предположим также, что он находится в пустом пространстве, так что на корабль практически не действуют силы притяжения. Если корабль имеет ускорение « $1g$ », то вы можете стоять на «полу» и ощущать свой нормальный вес. Если вы подбросите мяч, он «упадет» на пол. Почему? Потому что корабль ускоряется «вверх», но на мяч никакие силы не действуют, и он не ускоряется; он начинает отставать. Внутри корабля кажется, что мяч имеет ускорение « $1g$ », но направленное вниз.

Теперь сравним это с ситуацией, когда космический корабль находится не в полете, а стоит на поверхности Земли. *Всё то же самое!* Вас так же прижимает к полу, мяч так же падает с ускорением « $1g$ » и так далее. Действительно, как вы можете сказать, находясь внутри корабля, стоите вы на Земле или ускоряетесь в свободном космическом пространстве? Согласно принципу эквивалентности Эйнштейна это невозможно определить, если производить наблюдения только за объектами, находящимися внутри!

Если говорить строго, это утверждение верно только для одной точки внутри корабля. Поле сил тяготения Земли не совсем однородно, поэтому свободно падающий мяч имеет различные ускорения в различных точках — меняются и его направление и его величина. Но если мы представим себе однородное поле притяжения, то его можно в точности имитировать системой с постоянным ускорением. Такова основа принципа эквивалентности.

6.6. Ход часов в поле сил тяготения

Теперь мы хотим применить принцип эквивалентности, чтобы понять одну интересную вещь, происходящую в поле сил тяготения. Мы рассмотрим нечто, происходящее в космическом корабле, что вы вряд ли ожидали встретить в поле сил притяжения. Предположим, мы поместили часы в «голове» космического корабля — то есть в «переднем» конце — и такие же часы поместили в «хвосте», как на рис. 6.16. Назовем их часами *A* и *B*. Если мы сравним показания часов, когда корабль ускоряется, то окажется, что часы в голове идут быстрее часов в хвосте. Чтобы понять это, представим, что передние часы дают вспышку света каждую секунду, а вы сидите в хвосте, сравнивая видимые вами вспышки с ходом часов *B*. Пусть космический корабль находится в положении *a* на рис. 6.17,

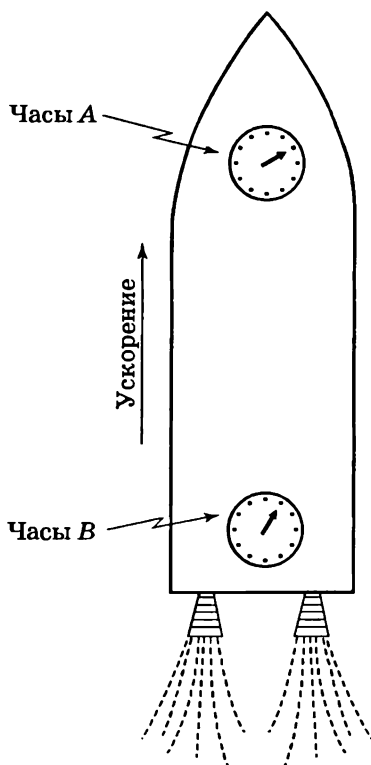


Рис. 6.16. Ускоряющийся ракетный корабль с двумя часами

когда часы A дают вспышку, и в положении b , когда ее свет достигнет часов B . Позже корабль окажется в положении c , когда часы A дадут следующую вспышку, и в положении d , когда ее свет достигнет часов B .

Свет первой вспышки проходит путь L_1 , а свет второй — более короткий путь L_2 . Это расстояние короче, потому что корабль ускоряется и в момент второй вспышки его скорость больше. Тогда понятно, что если вспышки часов A следуют с интервалом в одну секунду, то их свет достигает часов B с интервалом меньше одной секунды, поскольку свету следующей вспышки требуется для этого меньшее время. То же происходит со всеми последующими вспышками. Поэтому, если вы находитесь в хвосте, то придете к выводу, что часы A идут быстрее ча-

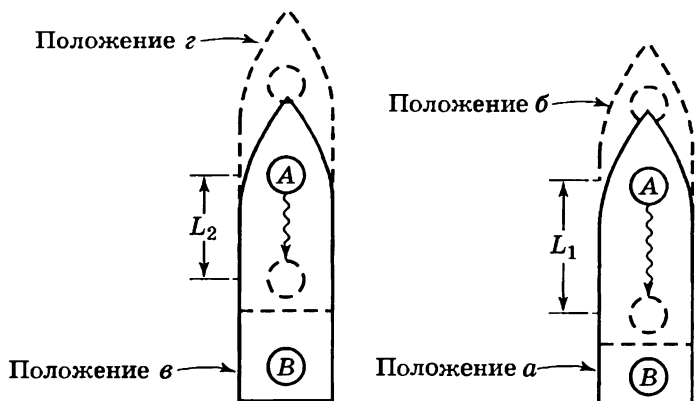


Рис. 6.17. Часы в голове ускоряющегося ракетного корабля кажутся идущими быстрее часов в хвосте

сов *B*. Если вы сделаете то же самое наоборот — заставите часы *B* давать вспышки и станете наблюдать за ними у часов *A*, — то придете к выводу, что часы *B* идут *медленнее* часов *A*. Всё сходится, и в этом нет ничего странного.

Но давайте теперь рассмотрим ракету, стоящую на Земле. *Происходит то же самое*. Если вы сидите на полу с одними часами и наблюдаете за другими часами, стоящими на высокой полке, то будет казаться, что они идут быстрее, чем часы на полу! Вы скажете: «Но это же неверно. Время должно быть одинаковое. Когда нет ускорения, то нет причин для нарушения хода часов». Но это происходит, если верен принцип эквивалентности. А Эйнштейн настаивал на этом, и смело и последовательно двигался дальше. Он предположил, что часы в различных точках гравитационного поля должны казаться идущими с разной скоростью. Но если одни часы *кажутся* идущими неправильно по отношению к другим часам, то с точки зрения первых часов другие идут неправильно.

Теперь вы понимаете, что мы провели аналогию с жуком, который двигался по «горячей» тарелке и вел измерения «горячей» линейкой. Мы предполагали, что линейки, жуки и все прочее изменяют длину одинаково при различной температуре, так что они никак не могут определить, что измерительные линейки меняются при перемещении по «горячей» тарелке. То же самое происходит с часами в гравитационном поле и в ускоряю-

щейся системе отсчета. Когда мы помещаем часы более высоко, то видим, что они идут быстрее. Биение сердца учащается, все процессы происходят быстрее.

Если бы этого не происходило, можно было бы обнаружить различие между гравитационным полем и ускоряющейся системой отсчета. Мысль, что время может меняться от одной точки к другой, — довольно трудна для понимания, но именно эту идею использовал Эйнштейн, и она верна, верите вы в нее или нет.

Используя принцип эквивалентности, мы можем узнать, как скорость хода часов зависит от высоты в гравитационном поле. Мы просто определим расхождение между часами в ускоряющейся ракете. Для этой цели проще всего использовать результат, полученный в 34-й главе I тома* для эффекта Доплера. Там мы нашли (см. (34.14)*), что если v — это *относительная* скорость источника и приемника, то *принятая* частота ω связана с частотой *испускания* ω_0 формулой

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (6.4)$$

Теперь, если мы обратимся к ускоряющемуся ракетному кораблю на рис. 6.17, то в любой момент времени источник и приемник движутся с равными скоростями. Но за то время, пока световой сигнал проходит от часов A до часов B , корабль ускоряется. Он приобретет дополнительную скорость gt , где g — ускорение, а t — время, за которое свет проходит расстояние H между A и B . Это время очень близко к величине H/c . Поэтому, когда сигнал достигнет точки B , скорость корабля увеличится на gH/c . Приемник всегда имеет такую скорость *по отношению к источнику* в момент выдачи сигнала. Следовательно, именно эту скорость мы должны использовать в формуле смещения Доплера (6.4). Предположив, что ускорение и длина корабля достаточно малы для того, чтобы эта скорость была гораздо меньше c , мы можем пренебречь членом v^2/c^2 . Тогда имеем

$$\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{gH}{c^2} \right). \quad (6.5)$$

* в первоначальных «Лекциях по физике».

Отсюда для часов на корабле получаем соотношение

$$(\text{Ход приемника}) = (\text{Ход источника}) \left(1 + \frac{gH}{c^2} \right), \quad (6.6)$$

где H — высота источника над приемником.

Согласно принципу эквивалентности, такой же результат должен иметь место для часов, разнесенных на высоту H в гравитационном поле с ускорением свободного падения g .

Этот результат настолько важен, что мы хотим показать, что он следует также из другого закона физики — закона сохранения энергии. Мы знаем, что сила притяжения, действующая на объект, пропорциональна его массе M , которая связана с общей энергией объекта E соотношением $M = E/c^2$. Например, масса ядра, определенная через энергию ядерной реакции, в результате которой одно ядро превращается в другое, согласуется с массой, полученной из атомного веса.

Представим себе атом, находящийся на высоком энергетическом уровне E_1 , который переходит в состояние низкого энергетического уровня E_0 , испуская свет. Частота испускаемого света ω определяется соотношением

$$\hbar\omega = E_1 - E_0. \quad (6.7)$$

Теперь предположим, что у нас имеется такой атом в состоянии E_1 , лежащий на полу, и мы переносим его с пола на высоту H . Для этого мы должны проделать работу по переносу массы $m_1 = E_1/c^2$ вверх в поле сил тяготения. Эта работа равна

$$\frac{E_1}{c^2} gH. \quad (6.8)$$

Теперь мы заставим атом испустить фотон и перейти в состояние низкого уровня E_0 . После этого мы переносим атом обратно на пол. При обратном перемещении масса равна E_0/c^2 ; мы возвращаем энергию

$$\frac{E_0}{c^2} gH, \quad (6.9)$$

так что общее количество проделанной работы равно

$$\Delta U = \frac{E_1 - E_0}{c^2} gH. \quad (6.10)$$

Когда атом испускает фотон, он отдает энергию $E_1 - E_0$. Теперь предположим, что фотон переместился на пол и был поглощен. Какое количество энергии он добавляет? Сначала можно предположить, что это количество равно $E_1 - E_0$. Но это не так, если энергия сохраняется. Мы начали перемещение с энергией E_1 на полу. Когда мы его закончили, энергия на уровне пола равна энергии E_0 атома в состоянии низкого энергетического уровня плюс энергия E_ϕ , полученная от фотона. В то же время нам следует учесть дополнительную энергию ΔU из (6.10). Если закон сохранения энергии справедлив, то энергия на полу в конце нашей операции должна быть больше начальной энергии на величину совершенной нами работы. А именно, мы должны иметь

$$E_\phi + E_0 = E_1 + \Delta U,$$

или (6.11)

$$E_\phi = (E_1 - E_0) + \Delta U.$$

Значит, фотон должен вернуться на пол не с той же энергией $E_1 - E_0$, которую имел в начале, а с *несколько большей энергией*. Иначе какая-то часть энергии окажется потерянной. Если подставить в (6.11) величину ΔU , полученную в (6.10), мы получим, что фотон прибывает на пол с энергией

$$E_\phi = (E_1 - E_0) \left(1 + \frac{gH}{c^2} \right). \quad (6.12)$$

Но фотон с энергией E_ϕ имеет частоту $\omega = E_\phi/\hbar$. Если мы обозначим частоту испускания фотона через ω_0 — которая согласно (6.7) равна $(E_1 - E_0)/\hbar$, — то наш результат в (6.12) даст нам снова соотношение (6.5) между частотой фотона, когда он был поглощен на полу, и частотой его испускания.

Тот же самый результат можно получить еще одним способом. Фотон с частотой ω_0 имеет энергию $E_0 = \hbar\omega_0$. Поскольку энергия E_0 соответствует гравитационной массе E_0/c^2 , фотон имеет массу (*не* массу покоя) $\hbar\omega_0/c^2$ и «притягивается» Землей. Падая с высоты H , он получает дополнительную энергию $(\hbar\omega_0/c^2)gH$, и суммарная его энергия равна

$$E = \hbar\omega_0 \left(1 + \frac{gH}{c^2} \right).$$

Но его частота после падения равна $E/\hbar$, что снова дает нам результат, полученный в (6.5). Наши идеи об относительности, квантовой физике и сохранении энергии не противоречат друг другу только в том случае, если предсказания Эйнштейна относительно часов в поле тяготения справедливы. Изменения частоты, о которых мы говорим, обычно очень малы. Например, для разности высот в 20 метров у поверхности Земли разница в частотах составляет примерно 2 части из 10^{15} . Однако именно такое значение было недавно получено экспериментально с использованием эффекта Мёссбауэра*. Эйнштейн был абсолютно прав.

6.7. Кривизна пространства-времени

Теперь вернемся к тому, о чем мы уже говорили — к идее искривленного пространства-времени. Мы уже указывали, что если время идет в разных местах с разной скоростью, то это аналогично искривленному пространству на горячей тарелке. Но это больше чем просто аналогия; это означает, что пространство-время *действительно* искривлено. Давайте попробуем построить геометрию пространства-времени. Сначала это может выглядеть необычно, но ведь мы часто рисовали диаграммы пространства-времени, откладывая расстояние на одной оси и время — на другой. Предположим, что мы пытаемся построить прямоугольник в пространстве-времени. Сначала мы рисуем оси — H в зависимости от t , как на рис. 6.18, а. Для построения основания нашего прямоугольника возьмем объект, находящийся в состоянии покоя на высоте H_1 , и нарисуем его мировую линию для отрезка времени в 100 секунд. Мы получим линию BD , параллельную оси t (рис. 6.18, б). Теперь возьмем другой объект, который находится на высоте 100 м над первым в момент $t = 0$. Он соответствует точке A на рис. 6.18, в. Теперь проведем его мировую линию для 100 секунд, измеренных по часам, находящимся в точке A . Объект переходит из точки A в точку C , как показано на рис. 6.18, г. Но заметим, что, поскольку время на разных высотах идет с разной скоростью — мы предполагаем, что существует гравитационное поле, — точки C и D соответствуют разным временам. Если мы попытаемся за-

* R.V. Pound and G.A. Rebka, Jr., *Physical Review Letters*, Vol. 4, p. 337 (1960).

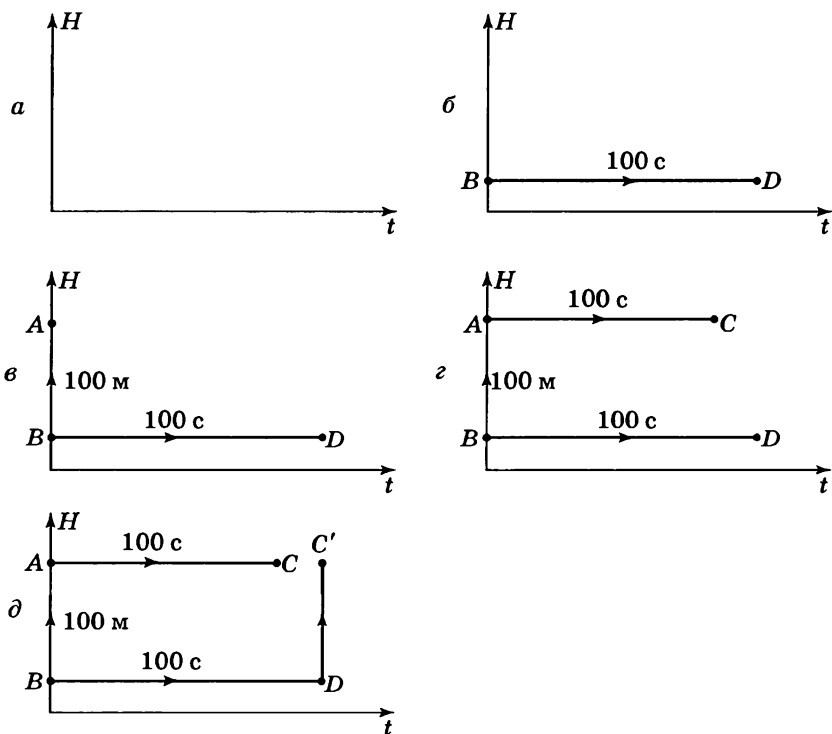


Рис. 6.18. Попытка построить прямоугольник в пространстве-времени

вершить прямоугольник, проведя прямую до точки C' , которая на 100 метров выше точки D в тот же момент времени, как показано на рис. 6.18, *д*, то наша ломаная линия не замкнется. Именно это мы имеем в виду, когда говорим, что пространство-время искривлено.

6.8. Движение в искривленном пространстве-времени

Давайте рассмотрим интересную задачу. У нас имеются одинаковые часы, A и B , расположенные на поверхности Земли, как показано на рис. 6.19. Мы поднимаем часы A на некоторую высоту H , держим их там некоторое время, а затем возвращаем

на прежнее место, так чтобы они прибыли туда точно в тот момент, когда часы *B* отсчитают 100 секунд. Тогда часы *A* покажут что-нибудь порядка 107 секунд, потому что на высоте они идут быстрее. Как должны мы перемещать часы *A*, чтобы они показали наибольшее время — при условии, что в момент их возвращения часы *B* показывают 100 секунд? Вы можете сказать: «Это легко. Надо поднять часы *A* как можно выше. Тогда они будут идти быстрее всего и покажут наибольшее время при возвращении». Неверно. Вы кое-что забыли — у нас только 100 секунд, чтобы подняться и опуститься. Если мы поднимем часы очень высоко, нам придется двигаться очень быстро, чтобы успеть добраться туда и вернуться через 100 секунд. Но не нужно забывать об эффекте в специальной теории относительности, который вызывает *замедление* часов с коэффициентом $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Этот эффект относительности работает на то, чтобы часы *A* показывали *меньшее время*, чем часы *B*. Как вы видите, наша ситуация напоминает некую игру. Если мы стоим неподвижно с часами *A*, то получаем 100 секунд. Если мы медленно поднимаемся на небольшую высоту, то получаем чуть больше 100 секунд. Если мы поднимемся чуть повыше, то, возможно, получим чуть побольше. Но если мы поднимемся слишком высоко, нам придется двигаться быстрее, чтобы попасть туда, и наши часы могут замедлиться настолько, что мы получим результат меньше 100 секунд. Какова зависимость высоты от времени — насколько надо подниматься и с какой скоростью, чтобы вернуться точно тогда, когда на часах *B* пройдет 100 секунд, — даст нам самые большие показания на часах *A*?

Ответ: определите, с какой скоростью надо подбросить мяч, чтобы он упал на землю через 100 секунд. Движение мяча — быстрый подъем, замедление, остановка и падение — и есть то самое движение, которое обеспечит наибольшее время на часах, прикрепленных к мячу.

Теперь рассмотрим немного другую игру. У нас имеются две точки *A* и *B* на поверхности Земли на некотором расстоянии друг от друга. Мы играем в ту же игру, что играли раньше, чтобы определить, что мы называем прямой линией. Мы задаемся вопросом, как нам следует двигаться от точки *A* к точке *B*, чтобы время движения на наших движущихся часах оказалось наибольшим — при условии, что мы стартуем из точки *A* по сигналу и прибываем в точку *B* по другому сигналу, который пода-

ется через 100 секунд после первого, ориентируясь по неподвижным часам. Теперь вы скажете: «Ну, мы ранее выяснили, что нужно двигаться по прямой линии с постоянной скоростью, подобранной так, чтобы прибыть в точку *B* точно через 100 секунд. Если мы отклонимся от прямой линии, это потребует большей скорости, и наши часы замедлят ход». Но погодите! Это было до того, как мы приняли в расчет тяготение. Не лучше ли двигаться по кривой, сначала немного вверх, а потом вниз? Ведь тогда в течение какой-то части времени мы окажемся выше, и наши часы пойдут немного быстрее? Да, это действительно так.

Если вы решите математическую задачу выбора такой траектории движения, чтобы время, прошедшее на движущихся часах оказалось наибольшим, вы найдете, что эта траектория оказывается параболой — той самой кривой, которую описывает тело, летящее по свободной траектории в поле сил тяготения (см. рис. 6.19). Поэтому закон движения в поле сил тяготения можно сформулировать таким образом: *объект всегда движется из одной точки в другую так, что часы на этом объекте показывают большее время, чем при движении по любой другой траектории* — конечно, с теми же самыми стартовым и финишными условиями. Время, измеряемое движущимися часами, часто называют «собственным временем» объекта. При свободном падении траектория такова, что собственное время объекта максимально.

Давайте посмотрим, как вывести все это. Начнем с уравнения (6.5), которое говорит, что *избыток* скорости движущихся часов равен

$$\frac{\omega_0 g H}{c^2}. \quad (6.13)$$

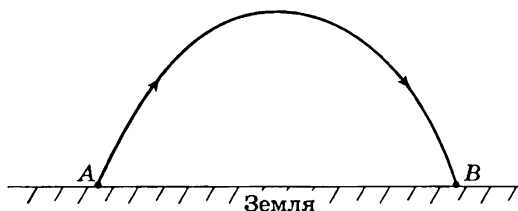


Рис. 6.19. В однородном поле тяготения траектория с максимальным собственным временем полета в течение фиксированного времени является параболой

Кроме того, нам надо помнить, что существует поправка противоположного знака для скорости. Относительно этого эффекта мы знаем, что

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Хотя этот принцип справедлив для любой скорости, мы будем считать, что скорость всегда значительно меньше c . Тогда мы сможем записать это соотношение как

$$\omega = \omega_0 (1 - v^2/2c^2),$$

и дефект скорости хода часов равен

$$-\omega_0 \frac{v^2}{2c^2}. \quad (6.14)$$

Объединяя выражения (6.13) и (6.14), имеем

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{c^2} \left(gH - \frac{v^2}{2} \right). \quad (6.15)$$

Такой сдвиг частоты наших движущихся часов означает, что если мы измерим время dt на фиксированных часах, движущиеся часы зафиксируют время

$$dt \left[1 + \left(\frac{gH}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) \right]. \quad (6.16)$$

Общий избыток времени на траектории — это интеграл от добавочного члена по времени, а именно

$$\frac{1}{c^2} \int \left(gH - \frac{v^2}{2} \right) dt, \quad (6.17)$$

который должен достигать максимума.

Член gH — это как раз потенциал сил тяготения ϕ . Умножим все выражение на постоянный коэффициент $-mc^2$, где m — масса объекта. Константа не изменит условия достижения максимума, но из-за знака «минус» максимум поменяется на мини-

мум. Тогда уравнение (6.16) говорит о том, что объект будет двигаться так, чтобы

$$\int \left(\frac{mv^2}{2} - m\varphi \right) dt = \min. \quad (6.18)$$

Но теперь подынтегральное выражение — это разность между кинетической и потенциальной энергиями. И если вы заглянете в 19-ю главу II тома^{*}, то увидите, что при обсуждении принципа наименьшего действия мы показали, что закон Ньютона для объекта в любом потенциальном поле может быть записан точно в форме уравнения (6.18).

6.9. Эйнштейновская теория тяготения

Эйнштейновская форма уравнений движения — о том, что собственное время должно достигать максимума в искривленном пространстве-времени — дает тот же самый результат, что и закон Ньютона для малых скоростей. Когда Гордон Купер совершал свои обороты вокруг Земли, его часы показывали большее время, чем это могло бы быть при любой другой траектории спутника, которую можно себе вообразить^{**}.

Итак, закон тяготения может быть сформулирован в терминах геометрии пространства-времени таким замечательным образом: частицы всегда движутся с наибольшим собственным временем и эта величина в пространстве-времени аналогична «кратчайшему расстоянию». Это закон движения в поле сил тяготения. Большое преимущество такой формулировки состоит в том, этот закон не зависит от координат или от других способов определения ситуации.

Теперь давайте подытожим то, что мы сделали. Мы получили два закона для тяготения:

- 1) как изменяется геометрия пространства-времени, когда присутствует вещество; а именно — кривизна, выражен-

* в первоначальных «Лекциях по физике».

**Строго говоря, это только *локальный* максимум. Нам следовало бы сказать, что собственное время больше, чем время для любой *близкой* траектории. Например, собственное время на эллиптической орбите вокруг Земли не обязательно должно быть больше, чем на баллистической траектории объекта, который выстреливается на большую высоту и падает назад.

ная в виде избытка радиуса, пропорциональна массе внутри сферы (уравнение (6.3));

- 2) как движутся объекты, если присутствуют только силы тяготения; а именно — объекты движутся так, что их собственное время между двумя граничными условиями достигает максимума.

Эти два закона соответствуют подобной паре законов, которые мы видели ранее. Мы первоначально описывали движение в поле сил тяготения в терминах ньютоновского закона тяготения с обратным квадратом и его законов движения. Теперь их место заняли законы 1 и 2. Наши новые законы также соответствуют тому, что мы видели в электродинамике. Там мы имели закон — систему уравнений Максвелла, — определяющий поле, создаваемое зарядом. Он говорит, как изменяется характер «пространства» в присутствии заряженной материи, что утверждает закон 1 относительно тяготения. Кроме того, у нас был закон о движении частиц в заданном поле — $d(mv)/dt = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Для тяготения это же делает закон 2.

Законы 1 и 2 дают точное изложение теории тяготения Эйнштейна, хотя обычно вы будете находить их сформулированными в более сложной математической форме. Мы должны, однако, сделать одно добавление. При перемещении тела в поле сил тяготения из одного места в другое меняется не только масштаб времени, но и масштаб длины. Когда мы движемся, длина линеек меняется. Когда пространство и время переплетены так тесно, невозможно, чтобы со временем произошло нечто такое, что тем или иным образом не отразилось бы на пространстве. Возьмем простейший пример: вы пролетаете мимо Земли. То, что вы считаете «временем» (с *вашей* точки зрения), является частично пространством (с *нашей* точки зрения). Поэтому должны происходить изменения и в пространстве. Присутствие вещества искривляет *единое пространство-время*; и это более сложное явление, чем изменение только масштаба времени. Однако правила, которое мы дали в уравнении (6.3), достаточно для полного определения всех законов гравитации, при условии, что это правило о кривизне пространства применяется не только с точки зрения одного человека, но справедливо для всех. Кто-либо, пролетающий вблизи материальной массы, увидит иное содержание этой массы из-за кинетической энергии, которую он вычислит, исходя из движения массы мимо него, а он должен учесть в расчетах ту массу, которая соответствует

энергии. Теория должна быть устроена так, чтобы каждый — независимо от того, как он движется, — нарисовав сферу, нашел бы, что избыток радиуса равен величине $G/3c^2$, умноженной на общую массу (или лучше, величине $G/3c^4$, умноженной на общую энергию) внутри сферы. Этот закон — закон 1 — должен быть справедлив в любой движущейся системе, и является одним из великих законов тяготения, который называют *эйнштейновским полевым уравнением*. Другой великий закон, закон 2, — что тела должны двигаться так, чтобы их собственное время было максимальным, — называется *эйнштейновским уравнением движения*.

Записать эти законы в полной алгебраической форме, сравнить их с законами Ньютона или соотнести их с электродинамикой — это довольно трудная математическая задача. Но именно так выглядят сегодня наши наиболее полные законы тяготения.

Хотя для рассмотренного нами простого примера они и дали результат, согласующийся с механикой Ньютона, так происходит не всегда. Экспериментально были подтверждены три расхождения, впервые полученные Эйнштейном. Орбита Меркурия не является фиксированным эллипсом; свет звезд, проходящий вблизи Солнца, отклоняется от прямой в два раза сильнее, чем следовало ожидать; и скорость хода часов зависит от их положения в поле тяготения. Во всех случаях, когда предсказания Эйнштейна отличались от идей механики Ньютона, Природа вставала на сторону Эйнштейна.

Подытожим все, что мы сказали, следующим образом. Во-первых, измерения времени и расстояния зависят от места в пространстве, где происходит измерение, и от времени. Это эквивалентно утверждению, что пространство-время искривлено. Исходя из измеренной площади поверхности сферы, мы можем определить предсказанный радиус, $\sqrt{A/4\pi}$, но действительный измеренный радиус будет иметь избыток, пропорциональный (с постоянной G/c^2) общей массе, заключенной внутри сферы. Эта величина определяет степень искривленности пространства-времени. И эта кривизна должна быть одной и той же независимо от того, кто смотрит на вещество, и как он движется. Во-вторых, частицы в этом искривленном пространстве-времени движутся по «прямым линиям» (траекториям максимально-го собственного времени). Таково содержание эйнштейновской формулировки законов тяготения.

О Ричарде Фейнмане

Ричард П. Фейнман родился в 1918 году в Бруклине, защитил диссертацию в Принстоне в 1942 г. Несмотря на свой молодой возраст, он сыграл важную роль в Манхэттенском проекте в Лос-Аламосе в годы Второй мировой войны. Впоследствии он преподавал в Корнелле и в Калифорнийском технологическом институте. В 1965 за свои работы в области квантовой электродинамики был удостоен Нобелевской премии по физике, разделив ее с Син-Итеро Томанагой и Джулианом Швингером.

Нобелевской премии д-р Фейнман был удостоен за успешное решение проблем теории квантовой электродинамики. Он также создал математическую модель, описывающую явление сверхтекучести жидкого гелия. Впоследствии, в сотрудничестве с Марри Гелл-Маном он осуществил фундаментальную работу в области слабых взаимодействий, таких как бета-распад. В последующие годы Фейнман играл ключевую роль в разработке теории кварков, предложив свою партонную модель для процессов, происходящих при столкновениях протонов высоких энергий.

Помимо этих работ, д-р Фейнман ввел принципиально новую вычислительную методику и условные обозначения, прежде всего, знаменитые фейнмановские диаграммы, которые более чем какая бы то ни было другая формальная система, изменили способ концептуального и математического представления основных физических процессов.

Фейнман обладал удивительным даром преподавания. Из всех своих многочисленных наград он больше всего гордился Эрстедовской медалью за преподавание, которой он удостоился в 1972 году. Фейнмановские лекции по физике, впервые опубликованные в 1963 году, были охарактеризованы обозревателем *Сайентифик Америкэн* как «трудные для усвоения, но питате-

льные и полные аромата. И сейчас, по прошествии 25 лет, они остаются *основным* руководством для преподавателей и для лучших из начинающих студентов». Чтобы облегчить понимание физики среди ненаучной общественности, д-р Фейнман написал «Характер физических законов» и «К.Э.Д.: Странная теория света и материи». Кроме того, он был автором множества специальных трудов, ставших классическими образцами и учебниками для исследователей и студентов.

Ричард Фейнман был видным общественным деятелем. Хорошо известна его работа в комиссии, расследовавшей крушение Челленджера, особенно его знаменитое доказательство подверженности колец уплотнителя воздействию холода — изящный эксперимент, который не потребовал ничего, кроме стакана ледяной воды. Менее известна работа Фейнмана в 1960-х гг. в составе Калифорнийского государственного образовательного комитета, где он выступал против посредственного уровня учебных пособий.

Простое перечисление огромного множества научных и учебных достижений Ричарда Фейнмана не может дать полного представления об этом удивительном человеке. Как знает всякий читатель даже самых специальных его трудов, живая и многосторонняя личность Фейнмана просвечивает сквозь все его произведения. Помимо того, что он был физиком, в разное время своей жизни он чинил радиоприемники, вскрывал замки, писал картины, танцевал, играл на бонго и даже расшифровывал иероглифическую письменность майя. Испытывая постоянную любознательность к окружающему его миру, он был образцовым эмпириком.

Ричард Фейнман умер 15 февраля 1988 г. в Лос-Анджелесе.

Предметный указатель

$E = mc^2$ 109

K-мезоны 70

β -распад 72

μ -мезоны 67, 68, 71

π -мезоны 67

аденин 84

азота молекулы 42, 44

аксиальный вектор 206

актомиозин 78

аминокислоты 82, 83, 84, 86

ангстрем 37

антиатомы 214

антивещество 213

антинейтроны 66, 214

антипротоны 66, 214

античастицы 66, 70, 214

астрономия и физика 86

атмосферное давление 38

атомная бомба 67

– энергия 257

атомная гипотеза 36

атомная механика, квантовое по-
ведение 137

атомный факт 36

атомы

– введение 33

– доказательство существования
50

– и обратимость во времени 200

– и сохранение энергии 301

– и физические процессы 42

– масса покоя 257

– масштаб 199

– меченые 82

– размер 36, 63

– свойства 57

– химические реакции 46

ацетилхолин 78

барионы 7–2, 110

белки 81–84, 86

бета-распад 210

бильярдные шары, столкновение
221

биология и физика 77

близодействия силы 57

Браге, Тихо 23

броуновское движение 50

будущее, подверженное влиянию
268

вероятность 140, 141, 146–151

вертикальное движение 119

вечное движение 98

вещество

– атомная гипотеза 36

– квантовая электродинамика 66

– свойства 56

– частицы в нем 57

взаимодействие на далеких рас-
стояниях 57

взаимодействие фотонов 72

взаимодействия сила 57

виртуальной работы принцип 105

вихревые жидкости 92

влияющее прошлое 268

внутренняя кривизна 289

вода

- атомная гипотеза 36
- испарение 42
- растворение твердых тел 44
- водород 87
- водяной пар 42
- волны
 - избыточное давление и звук 57
 - поведение 61, 65
 - эксперимент квантового поведения 141
 - электромагнитные 61
- воспроизведение 84
- время и пространство 57, 62
- время и сохранение энергии 110
- Вселенной возраст 133
- всемирное тяготение 122
- вулканические процессы 89
- газы, атомная гипотеза 38
- галактика (форма) 126
- Галилей 116
- гамма-излучение 61, 66, 236
- ГДФ и ГТФ 81
- гелий 41, 87
- Гелл-Ман, Марри 68
- гемоглобин 83
- геология и физика 88, 89, 91
- горение 47
- горизонтальное движение 119
- горы 89
- гравитоны 70, 71
- грузоподъемные машины 98
- гуаназиндифосфат (ГДФ) 81
- гуаназинтрифосфат (ГТФ) 81
- гуанин 84
- Гудстейн, Дэвид 26
- давление
 - атмосферное 38
 - газа в замкнутом объеме 38
- Дайсон, Фримен 165
- движение
 - законы 116
 - энергия 105
- двойные звезды 124
- дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) 83
- динамический процесс 45
- домкрат 104
- Доплера эффект 277, 300
- доступность энергии 110
- дыхательный цикл 79
- Евклид 57
- жидкости
 - атомная гипотеза 40
- закон обратных квадратов 117, 126
- законы природных явлений 55, 95, 113, 115
- законы сохранения
 - массы 255
 - паритета 211
 - симметрии 200
 - четырехмерных векторов 275
- запах и молекулы 47
- заряд и электрическое поле 58–60
- заряд электрона 67
- заряд, квантовая электродинамика 66
- звезды 86–89, 91, 92, 114, 122, 124–128
- звук, волны избыточного давления 57
- землетрясения 89
- Земля
 - масса 129
 - скорость 222
- изотопы 82
- импульс 109
 - неопределенность 63
 - сохранение 109
- инерция 57, 116, 117, 133
- интерференционные эксперименты, квантовое поведение 139
- инфракрасные частоты 61
- ионы, определение 44
- искривленное пространство
 - геометрия 285
 - двумерное 279
 - кривизна 292, 293
 - определение 285, 287, 288, 290, 292
 - отрицательная кривизна 288
 - положительная кривизна 288

- средняя кривизна 292
- трехмерное 290
- искривленное пространство-время 62
- испарение 42, 48
- испарение воды 42–44
- Кавендиша эксперимент 128
- квантовая механика
 - в химии 76, 77
 - и тяготение 135
 - исходные принципы 155
 - принцип неопределенности 159
 - свойства 62, 63, 65, 66
- квантовая химия 56, 76, 77
- квантовая электродинамика 66, 72, 73
- квантовое поведение
 - атомная механика 137
 - интерференция электронных волн 146
 - эксперимент с волнами 141
 - эксперимент с пулями 139
 - эксперимент с электронами 144
- Кеплера законы 114
- кинетическая энергия 47, 63, 97, 105, 106, 107, 108, 109
- кислорода молекулы 37, 38, 42, 44
- клетки, биологические функции 78
- кобальт 211, 212, 214
- колебания волн 61
- Коперник 114
- космические лучи 62, 67
- коэффициент преломления плотных сред 137
- Кребса цикл 79
- кристаллическая решетка 40
- лед, атомная гипотеза 40
- Лейтон, Роберт 166
- лептоны 69, 70, 71, 110
- Луна и закон тяготения 118
- лямбда-барионы 70
- магнетизм
 - заряды в относительном движении 60
 - как природное явление 55
- масса
 - Земли 129
 - пропорциональность силе тяготения 133
 - электрона 67
- математика и физика 75
- маятник 105
- мезон как явление природы 55
- мезоны 67, 68, 70, 71, 72
- мембрана клетки 78
- метеорология 88
- механика как явление природы 55
- микроскопы 36
- микросомы 85
- миозин 78
- молекулы
 - кислорода/азота 42
 - понятие 45
 - химические реакции 46
- момент количества движения 109, 126
 - сохранение 201
- МэВ, единица 68
- мю-мезоны 110
- мюоны 67, 68, 71
- наблюдение и научный метод 54
- наклонная плоскость 103
- направление
 - вектора 192
 - влияние 177
- направленные величины 182
- натурфилософия 75
- науки о Земле 88
- научный метод 54
- нейтрино 70
- нейтроны 59, 65, 67, 68, 70, 72
- необратимые термодинамические процессы, их энтропия 111
- неопределенности принцип 63, 135, 153
- неорганическая химия 75, 76
- нервная система 90
- нервные клетки 77
- неуравновешенная электрическая сила 58

- Нобелевская премия по физике 15, 22, 25
 нулевая масса 71
 Ньютона законы 62, 117, 118, 120, 124, 134
- обратимые машины 99
 объединение классов природных явлений 55
 оптика как явление природы 55
 оптический микроскоп 50
 органическая химия 49, 77
 осаждение 46
 основы физики 54, 65
 относительность
 — и тяготение 134
 — теория 72
 отталкивание и электрические силы 58
- память 90
 пар, атомная гипотеза 38
 паровые машины 98
 Пастер, Луи 93
 периодическая система Менделеева 68, 76
 периодическая таблица Менделеева 71
 пионы 67
 плавление, определение 41
 планетарное движение и тяготение 113
 Планка постоянная 109, 158
 плотность
 — пропорциональность давления газа 39
 погода 88, 89, 92
 позитроны 66, 109, 110
 полное внутреннее отражение 137
 положение, неопределенность 63
 потенциальная энергия 102
 потенциальная энергия тяготения 98
 «правила игры» 54, 55
 приливы, притяжение Луны 121
 принцип виртуальной работы 105
- притяжение и электрические силы 58
 пролин 83
 пространство и время 57, 62, 73
 пространство, сохранение импульса 110
 протоны 59, 65, 67, 68, 70
 психология и физика 90
 пули, эксперимент квантового поведения 139
 работа виртуальная 105
 радиоволны 61
 радиолокационные волны 61
 радиус-вектор 115
 размышление и научный метод 54
 растворение воздуха и твердых веществ в воде 44
 растворение и кристаллизация 45
 растения
 — биология 79
 — испарения 48
 расширение газа 40
 резонансы 70
 рентгеновские лучи 55, 61, 62
 РНК 85, 86
- свет
 — в астрономии и физике 86, 87, 108
 — возникновение при горении 47
 — излучение 66
 — как явление природы 55
 — квантовая электродинамика 66
 — эксперимент с электронами 149
 — энергия 108
 световые волны 61, 138
 сжатие газа 40
 сигма-барионы 70
 сила
 — и инерция 57
 — и расстояние 126
 — пропорциональная площади 39
 сильное взаимодействие частиц 72
 симметрия атомов льда 41
 система Земля-Луна, с приливами 121

- скалярное произведение 191, 276
скопление галактик 126
скорость
– Земли 222
скорость и кинетическая энергия 106
слабый распад 72
смещение 182
Солнце и движение планет 114
соль, растворенная в воде 44
сохранение энергии
– другие формы энергии 107
– закон 77, 95, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109, 111
– кинетическая энергия 105
– потенциальная энергия тяготения 98
статистическая механика 76, 87
Стевин 104
столкновение
– анализ 251, 273
– неупругое 254
«странность» частиц 68
тайный заговор как закон природы 228
твердое тело
– атомная гипотеза 40
– растворенное в воде 44
текущее время (область пространства-времени) 267
температура
– газа 40
– и геология 89
тепловая энергия 97, 107
теплота
– движущиеся частицы 57
– и движение молекул 37
– и статистическая механика 76
– как природное явление 55
– от горения 47
термодинамика 76
термоядерная реакция 111
технеций 87
тимин 84
Томанага, Син-Итеро 25
тротила взрыв 67
туманности и закон тяготения 127
турбулентное течение 88
тяготение
– взаимодействие частиц 72
– всемирное 122
– движение планет 113
– закон Ньютона 117
– законы Кеплера 114
– и относительность 134
– искривленное пространство-время 62
– как природное явление 55
– механизм 130
– определение 57
– развитие динамики 116
– сравнение с силами электричества 58, 131
– эксперимент Кавендиша 128
угарный газ 47
углекислый газ (CO_2) 47, 48
углерод 46, 47
ультрафиолетовые частоты 61
упругая нить 128
ускорение 113, 117
ускорение к центру на круговой траектории 120
ускорения
– вектор 187
устройство для подъема грузов 98
Фейнман, Ричард 11, 13
ферменты 81, 82
физика
– введение 53
– до 1920 года 56
– и астрономия 86
– и биология 77
– и геология 88
– и психология 90
– и химия 75
– отношение к другим наукам 75, 91
– ядерная 55, 67
– ядра и частицы 67
физическая химия 76
философия и физика 64, 75

- фотоны
 - свойства 70
 - взаимодействие 72
- фотосинтез 79
- химическая формула 48
- химическая энергия 97, 108
- химические реакции
 - атомная гипотеза 46
 - как явление природы 55
- химия и физика 75
- хлорид натрия 44
- центробежная сила 243
- цилиндр, кривизна 289
- циркуляция жидкости 92
- цитозин 84
- частицы
 - «странность» 68
 - виды взаимодействий 71
 - и ядра 67
 - их виды 57
 - масса покоя 71
 - определение 57
 - поведение 62, 138
 - с нулевой массой 70
 - с нулевым зарядом 70
 - элементарные 69
- частоты электромагнитных волн 61, 62, 65
- часы
 - замедление в движущейся системе 228
 - скорость хода в гравитационном поле 297, 306
- Челленджер (космический челнок) 13, 170
- число S частицы 68
- чувственное восприятие, психология 90
- шаровое звездное скопление 124
- Швингер, Джулиан 25
- эволюция 91
- Эйнштейн, Альберт 12, 13, 22, 62, 109, 113, 134
 - законы искривленного пространства-времени 169
- эксперимент
 - его техника и физика 82
 - и научный метод 54, 64
- электрическое поле
 - и магнетизм 60
 - квантовая электродинамика 66
 - определение 60
- электромагнитные волны 61
- электрон
 - масса/заряд 67
 - определяет химические свойства 59
 - позитрон как противоположно заряженный 66
 - свойства 59
 - сравнение с мюоном 71
- электронный микроскоп 50
- эллипс 114–116
- энергия
 - активации 80
 - движения 105
 - звезд/Солнца 87
 - излучения 97, 108
 - тяготения 72, 97, 106
 - источники 111
 - массы 97, 109
 - упругости 97
 - формулы для разных форм 97
- энтропия 111
- эрозия 89
- Юпитера луны 118
- явления природы 55
- ядерная физика
 - как явление природы 55
 - ядра и частицы 67
- ядерная энергия 97, 108
- ядерные реакции в звездах 88
- ядерные силы взаимодействия частиц 72
- ядра
 - и частицы 59, 67
 - размер 63

Учебное издание

Фейнман Ричард

Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее

Ведущий редактор Б. Копылов

Художник Ф. Инфантэ

Художественный редактор О. Лапко

Компьютерная верстка В. Носенко

Подписано в печать 11.04.05. Формат 60х90 $\frac{1}{16}$.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 20,0. Тираж 5000 экз. (1-й завод 2000). Заказ 4394

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

Телефон (095) 157-19-02. E-mail: Lbz@aha.ru

<http://www.Lbz.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов

в полиграфической фирме «Полиграфист».

160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.

ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ:

ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ
И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ



Имя выдающегося американского физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии **Ричарда Фейнмана** (1918–1988), широко известно во всем мире. Одним из итогов его работ явились многотомные «Фейнмановские лекции по физике», которые в полном объеме были изданы более 40 лет назад в переводе на русский язык и к настоящему времени, по сути, стали библиографической редкостью.

Настоящее издание имеет целью в некоторой степени восполнить этот пробел. В него включены 12 избранных лекций Р. Фейнмана, прочитанных им в Калифорнийском технологическом институте и посвященных актуальным проблемам современной физики.

Не только специалисты, научные работники и студенты вузов найдут в книге много для себя интересного и полезного, но – учитывая простоту и доступность изложения – и учащиеся старших классов общеобразовательных школ.

ISBN 5-94774-337-X



9 785947 743371 >