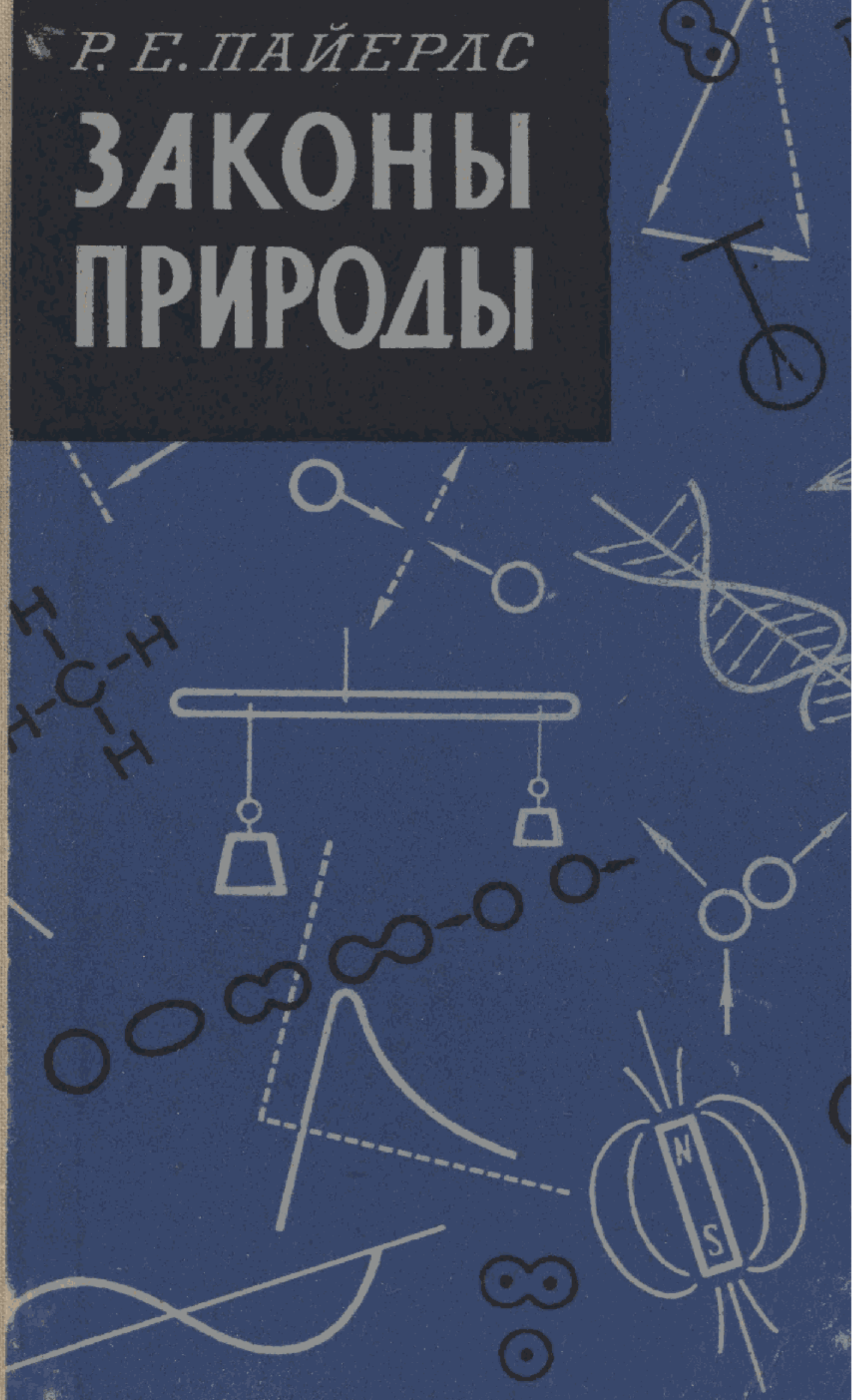


Р. Е. ПАЙЕРЛС

ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ



Р. Е. ПАЙЕРЛС

ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ИСПРАВЛЕННОЕ

Перевод с английского
под редакцией
проф. И. М. ХАЛАТНИКОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1962

The Laws of Nature

R. E. PEIERLS

C. B. E., F. R. S.

*Professor of Mathematical Physics,
University of Birmingham*

LONDON

GEORGE ALLEN & UNWIN LTD
RUSKIN HOUSE · MUSEUM STREET

Р. Е. Пайерлс. Законы природы.

М., Физматгиз, 1962 г., 340 стр. с илл.

Редакторы: В. А. Григорова и В. Я. Дубнова.

Техн. редактор Е. А. Ермакова.

Корректор А. Д. Халанская.

Сдано в набор 10/I 1962 г. Подписано к печати 19/III 1962 г. Бумага $84 \times 108^{1/2}$.
Физ. печ. л. 10,625. Условн. печ. л. 17,43. Уч.-изд. л. 17,44. Тираж 50 000 экз.
Цена книги 63 коп. Заказ № 2591.

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Московского городского совнархоза. Москва, Ж-54, Валуевская, 28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора перевода	6
Предисловие автора	8
Введение	13
Глава 1. Движение и сила	17
Законы Ньютона	17
Тяготение и другие силы	22
Импульс и энергия	25
Столкновения	32
Момент количества движения	36
Начальные условия и степени свободы	41
Глава 2. Электричество и магнетизм	44
Закон Кулона	44
Силовые линии	49
Законы поля или действие на расстоянии	54
Электромагнетизм	57
Индукция. Генератор и трансформатор	63
Окончательная формулировка законов	67
Электромагнитные волны	71
Энергия поля	76
Глава 3. Свет	79
Спектр. Интерференция. Волны	79
Дифракция, поляризация, скорость	85
Свет состоит из электромагнитных волн	89
Корпускулярная теория. Геометрическая оптика	91
Глава 4. Атомы и электроны	99
Химия и гипотеза об атомах	99
Размеры атомов. Ионы	103
Электрон	107
Как устроен атом?	109
Почему электроны не падают на ядро?	113
Многие факты можно понять	114
Глава 5. Хаотическое движение атомов. Тепло как беспоря- дочное движение	117
Количество тепла. Тепло и беспорядок	117
Теплота и движение атомов	121

Достоверность и законы случая	126
Новые эксперименты и некоторые трудности	129
Твердые тела и жидкости	133
Тепловое излучение	137
Глава 6. Теория относительности	141
Общие замечания	141
Движение и покой	144
Лорентцево сокращение	147
Как сравнивать длины и времена	150
Сложение скоростей	156
Механика быстро движущихся тел	157
Приложения и подтверждения теории	162
Принцип эквивалентности	165
Общая теория относительности	168
Глава 7. Кванты, волны и частицы	173
Гипотеза квантов. Фотоны	173
Дифракция электронов. Стоячие волны	181
Переменная длина волны	186
Атом водорода	191
Частицы и волны	194
Принцип неопределенности	201
Глава 8. Свойства атомов	212
Водород и гелий	212
Другие легкие атомы. Принцип Паули	216
Момент количества движения	220
Эксперимент с пучком атомов. Спин	227
Электронные оболочки, ионные молекулы	232
Другие типы молекул	236
Твердые тела, металлы, жидкости	240
Прохождение через потенциальный барьер	248
Глава 9. Электроны при высоких скоростях	253
Отрицательные энергии. Трудности	253
Спин. Позитроны	257
Силы при больших скоростях. Другие трудности	262
Новые методы. Лэмбовский сдвиг	266
Глава 10. Атомное ядро	272
Радиоактивность. Альфа-распад	272
Волновая механика решает другой парадокс	277
Расщепление ядра	280
Новое оборудование	282
Нейтроны, изотопы, дефект массы	287
Ядерные силы	291
Модель оболочек. Возбужденные состояния	296
Бета-лучи.	298
Деление. Источники энергии	302

Глава 11. Мезоны и другие новые частицы	309
Космические лучи и приборы для их изучения	309
Известные частицы	314
Мезоны	316
Теория Юкавы. Еще мезоны	320
Еще частицы. Открывается новая глава	328
Где мы остановились?	332
Список обозначений	340

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга Р. Е. Пайерлса «Законы природы» представляется нам в своем роде уникальной. Если по отдельным частным проблемам современной физики и существуют популярные книги, хоть и в небольшом количестве, то такой книги, которая давала бы в популярной форме представление о всей современной физике, до сих пор не было. Настоящая книга, написанная известным английским физиком-теоретиком Р. Пайерлсом, является первой книгой подобного рода. В ней в доступной для широких кругов читателей форме излагаются основные законы современной физики.

Автору при написании книги пришлось проделать колоссальный труд. Дело в том, что законы современной физики, как известно, для своей строгой формулировки требуют привлечения сложного математического аппарата. Р. Пайерлс в предлагаемой книге сделал попытку обойтись при формулировке законов физики без применения этого аппарата. Естественно, что при этом он смог дать только представление об основных законах физики и не мог дать тех количественных следствий из них, которые неизбежно требуют применения математики.

Следует отметить, что поставленную перед собой задачу автор, несомненно, выполнил успешно. Однако, учитывая сложность современной физики, необходимо иметь в виду, что не все разделы ему удалось довести до уровня общедоступных. Поэтому читателей не должны смущать случаи, когда те или иные места книги не будут поняты при первом чтении. Можно вместе с автором порекомендовать читателю вернуться к этим местам вторично после прочтения всей книги.

Следует иметь также в виду, что автор не ставил перед собой цели излагать историю тех или иных проблем

в физике. Из книги можно узнать лишь те представления, к которым физика пришла в настоящее время.

Книга, несомненно, окажется полезной для всех тех, кто интересуется современной физикой, но не работает непосредственно в этой области знания. Ее с интересом и пользой прочтут ученики старших классов, студенты вузов, лица, интересующиеся философией естествознания.

Перевод книги выполнен Л. П. Горьковым и И. Е. Дзялошинским.

И. М. Халатников

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Замысел этой книги возник после второй мировой войны, когда мне пришлось часто читать лекции об атомной энергии для различных аудиторий. При этом я столкнулся с тем фактом, что, кроме обычных вопросов о природе и опасности атомного оружия, всегда находились люди, интересовавшиеся основами физики. Как принцип неопределенности связан с тем или с этим? Почему атомное ядро не разваливается? Что такое мезон и какое отношение он имеет к ядерным силам, если энергия ядра недостаточна, чтобы он фактически образовался?

Очевидно, некоторые слушатели были заражены той самой научной любознательностью, которая побуждает ученого исследовать тайны природы, и у меня возникло желание ответить на их вопросы. Стремиться к познанию законов природы является долгом ученого перед обществом. Его работа и состоит в том, чтобы найти ответ, когда он стал насущной необходимостью. Приятно в то же время передавать свои знания людям, которые к ним стремятся.

Однако ясно, что в этом деле трудно преуспеть за те несколько минут в конце лекции, которые отводятся обычно для ответов на вопросы. Вопрос может затрагивать квантовую теорию, знакомство с которой трудно предполагать у спрашивающего. И если бы даже и было время на изложение основ квантовой теории, при этом все равно пришлось бы подразумевать у спрашивающего некоторые

познания об атомах или волнах, иначе ответ на один вопрос превратился бы в целый курс лекций. В то же время я заметил, что в некоторых случаях, когда ответ можно дать, не слишком углубляясь в обсуждение исходных пунктов, это удастся сделать простым языком и без математики. Действительно, я неоднократно убеждался, что, излагая свои доводы по возможности просто, избегая технических терминов, я помогал самому себе уяснить их гораздо лучше, чем если бы я пользовался их математической формулировкой.

Это навело меня на мысль попытаться изложить основы современной физики простым языком, в форме, не предполагающей никаких предварительных знаний. Мой опыт убедил меня как в возможности осуществить это в разумных границах, так и в том, что мои собственные представления станут после этого более ясными для меня самого. В справедливости последнего я уже убедился, прав ли в остальном — предоставляю судить читателю.

Я стремился сделать книгу понятной для неспециалиста. У читателя не предполагается никаких особых познаний в науке, хотя имеющему некоторое знакомство с физикой будет легче следить за изложением. Это касается прежде всего двух первых глав. Поскольку механика и электричество знакомы многим читателям, я приводил все относящиеся сюда аргументы более подробно, с тем чтобы дать примеры типичных физических рассуждений, которые в следующих главах я уже был вынужден излагать более поверхностно. Может быть поэтому некоторым читателям, не привыкшим к образу мыслей физика, отдельные места в первых двух главах покажутся несколько запутанными. Я посоветовал бы им возвращаться к этим пунктам и перечитывать их, когда они в последующих главах встретятся с вопросами, затрагивающими основы механики или электричества.

Вероятно, найдутся также читатели, знакомые с математикой в большем объеме, чем я ее использовал в книге, однако небольшое увеличение числа математических выкладок едва ли помогло бы делу, если у читателей нельзя предположить знания дифференциальных уравнений. Тем из них, у кого познания в математике простираются достаточно далеко, следовало бы предпочесть более специальную книгу. Но, как я убедился, даже студентам-физикам не вредно познакомиться с аргументами, изложенными в простой описательной форме, и я неоднократно с успехом использовал в факультативных лекциях для студентов некоторые примеры, выработанные мною в процессе написания этой книги.

Я считал бы труд, затраченный на написание книги, полностью вознагражденным, если мне удалось, пусть даже очень бегло, показать читателю, совсем не знакомому с наукой, цели, методы и умозаклучения ученого. В наши дни преобладания специального образования можно услышать о типе ученого или инженера, духовные интересы которого ограничены узкой областью, и в чьем образовании полностью пренебрегалось общечеловеческими ценностями, включая искусство и гуманитарные науки. Вполне возможно, такой тип действительно существует, хотя он был бы совершенно не похож на большинство знакомых мне ученых и инженеров. Однако я уверен, что существует также другая крайность, именно человек, чье воспитание ограничивалось искусством и гуманитарными науками и чьи интересы далеки от естественных наук. Действительно, найдется достаточно много педагогов, считающих, что естественные науки не имеют большого воспитательного значения. В своих намерениях увеличить объем знаний, сообщаемых студентам на гуманитарных факультетах, они ограничиваются стремлением включить такие предметы, как историю науки,

философию науки, считая их изучение делом более respectable, чем изучение самих естественных наук. Возможно, что это и привлекательные предметы, но я не верю, чтобы изучение их было полезным, если студенты не понимают основ самих естественных наук. Это напоминает попытки преподавать историю искусства человеку, который никогда не видел ни одной картины, или теорию музыки глухому. Я не сомневаюсь поэтому, что в любой попытке ввести некоторые аспекты естественных наук в систему гуманитарного образования был бы целесообразен подход, который я выбрал в этой книге.

Уже имея перед собою законченную рукопись, я полностью отдавал себе отчет, как много важного мною опущено. Кроме ограничений, накладываемых самой темой, объем книги не позволил мне дать описание многих деталей физических приборов и коснуться многих практических вопросов, о которых мы всегда должны помнить, поскольку занимаемся экспериментальной наукой. Я, надеюсь, не позволил читателю забыть, что путь, по которому мы пришли ко всем нашим заключениям, зависит от опытного познания и экспериментирования, хотя эта книга и не дает картины действительной жизни экспериментатора и всего происходящего в его лаборатории. Поэтому некоторые из моих коллег, для которых наибольший интерес в физике лежит в области конструирования и использования новых остроумных приборов, может быть найдут, что основное ударение в моей книге сделано не там, где нужно.

Кроме того, развитие идей приходилось изображать значительно более прямым, чем это было исторически. Я мог описать лишь идеи, которые подтверждены экспериментом в своей первоначальной форме, и не упоминал о тех гораздо более многочисленных, которые опровергнуты или оказались неконструктивными и были впо-

следствии оставлены. Точно так же я не мог и пытаться передать чувства человека, наблюдающего, как растут и подтверждаются эти новые идеи,— чувства, хорошо описанные в недавних рейтовских лекциях доктором Дж. Р. Оппенгеймером, которого, напротив, многие критики порицали за то, что он не сделал того, что попытался сделать в этой книге я.

В заключение я хотел бы поблагодарить всех, чьим должником я являюсь. Мысли, содержащиеся в этой книге, никоим образом не новы и не принадлежат лично мне, они представляют собой обычное вооружение из арсенала современного физика. Я не смог бы их изложить, не вспоминая многих моих учителей, в том числе, Гейзенберга, Паули и прежде всего Нильса Бора, а также многочисленных коллег, которые помогли мне познакомиться с предметом и достичь некоторой степени понимания. Многие мои друзья, молодые и старые, помогли мне, согласившись быть своего рода «морскими свинками», на которых я испытывал отдельные части книги; все они делали ценные замечания. Я хотел бы также выразить свою признательность профессору Ланселоту Ходжбену за конструктивную критику.

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех отраслей науки изучение строения материи и законов, управляющих явлениями природы, всегда имело особенную прелесть. В конечном счете дух научного исследования рождается из любопытства маленького ребенка, который непременно должен разобрать часы, чтобы увидеть, почему они работают. Исследование основных законов есть то же самое любопытство, доведенное до своего логического конца.

Овладев механизмом часов, мы уже спросим, что заставляет зубчатые колесики, или пружину, или светящиеся цифры на циферблате вести себя так, как они это делают, и это приведет нас прямо к проблемам, затрагивающим строение материи. Первоначально такими проблемами занимались и физики и химики, но с тех пор, как современная атомная теория показала, что законы химии являются следствием физических законов, дальнейшее углубление основных законов осталось на долю физиков.

Когда мы говорим здесь о материи, мы подразумеваем под этим только неодушевленную материю. Законы природы, которые будут обсуждаться на протяжении этой книги, не включают описания жизни или живых существ. Мы не касаемся вопроса, насколько вероятно и даже возможно ли, что в будущем поведение живой материи может быть описано количественными законами, настолько же полными, как те, которые описывают поведение часов или атомов.

В этой книге я попытаюсь кратко обрисовать все, что мы знаем о строении материи и о соответствующих физических законах, а также продемонстрировать некоторые доказательства, убеждающие нас в том, что мы находимся на правильном пути.

Стоит упомянуть об опасности, связанной с краткостью такого описания. Часто ради простоты приходится, а это будет необходимо и в нашей книге, упоминать только один или только немногие из фактов при доказательстве новой и, возможно, неожиданной теоретической идеи. Поэтому книга приобретает некоторые черты детективного романа, где личность убийцы устанавливается только одним важным фактом, без которого задача представлялась бы неразрешимой.

Действительно, автор детективного романа побуждает своего читателя построить альтернативное решение, которое связывало бы все нити следствия. В таком же духе читатель научно-популярной книги выдумывает случайно некую теорию, которая, казалось бы, объясняет главные «улики» столь же хорошо, как и распространенная среди физиков точка зрения, или, может быть, даже лучше. Такое, в частности, случается с результатами теории относительности и квантовой теории, кажущихся противоречащими здравому смыслу. И, пожалуй, естественно, чтобы читатель попытался (как уже пытались все физики) построить менее революционную теорию, которая объяснила бы данные эксперимента.

Но последние включают в себя гораздо больше, чем несколько типичных примеров, кратким перечнем которых нам пришлось ограничиться. Физический довод никогда не считается правильным на основании отдельного экспериментального факта. Отдельный эксперимент часто имеет существенное значение, потому что обращает внимание на необходимость пересмотра наших взглядов. Он может оказаться достаточным для того, чтобы подсказать новое объяснение, но это новое объяснение будет, однако, считаться делом вкуса до тех пор, пока не появятся новые факты, согласующиеся с ним, и пока предсказания, основанные на новой гипотезе, не будут подтверждены многими путями, так что мы убедимся в ее надежности.

Каждый, кто хочет познакомиться с методами естественных наук, должен поэтому познакомиться не просто с несколькими экспериментами, а с достаточным количеством доказательств во всех их деталях, только тогда он сможет в каждом случае сам судить об их силе.

Читатель этой книги находится в одинаковом положении с человеком, прочитавшим в газете отчет о судебном процессе. Здесь ему приведут ряд доказательств, на которых был основан приговор, но если он захочет утверждать, что суд ошибся, ему придется углубиться в техническую сторону доказательств, при помощи которых суд создавал свое мнение.

В этом месте читатель, вероятно, возразит: если физики действительно так осторожны в формировании своих мнений, почему их взгляды на законы природы подвергаются таким коренным изменениям, как в случае теории относительности, которая разрушила механику Ньютона, или в случае теории световых квантов, заменившей волновую теорию света? Как могли ученые на протяжении столетий верить в теории, которые впоследствии оказались неправильными?

Это действительно важный вопрос. Ответ состоит в том, что физика (или, в этом смысле, любая другая опытная наука) не может утверждать, что ее результаты есть абсолютная и окончательная истина. Можно утверждать лишь, что мы имеем некоторую картину, которая во многих отношениях очень близка к истине, в действительности настолько близка, что для большинства приложений различие несущественно. С течением времени законы физики, которые мы сформулировали, подвергаются более точной проверке или проверяются в гораздо более широкой области, чем та, где они были первоначально получены. Иногда таким путем обнаруживается необходимость их пересмотра, и эти законы должны быть расширены так, чтобы включить явления, о существовании которых прежде и не подозревали. Однако их предыдущая форма остается пригодной для всех практических целей при описании тех явлений, для которых они были впервые выведены.

Когда в последующих главах мы рассмотрим наиболее революционные изменения в наших взглядах, мы увидим, что в действительности эти изменения означают не отказ от старых законов, как от неправильных, но лишь признание их неполными.

Этот процесс постепенного уточнения законов, при помощи которых мы описываем явления природы, весьма

характерен для науки о природе. Быть может простая аналогия поможет пояснить этот пункт. Посмотрев на фотографию снежного ландшафта, на которой часть снежного поля освещена солнцем, а другая находится в тени, мы описали бы ее, сказав, что одна ее часть очень светлого серого цвета, почти белого, а другая заметно темнее. Изучив ту же фотографию в микроскоп более внимательно, мы найдем, что серые участки в действительности состоят из маленьких черных точек на белом фоне, т. е. зерен серебра, образовавшихся при фотографическом процессе, более темные участки отличаются от светлых бóльшим количеством черных точек.

В известном смысле это открытие доказывает неправильность первого описания, однако более целесообразно было бы сказать, что новое описание уточняет старое и заменяет его, когда мы интересуемся гораздо более мелкими деталями, чем в первом случае. Старое описание достаточно хорошо, если мы ограничимся рассматриванием фотографии простым глазом. Действительно, будучи проще, это описание более пригодно для наших целей. Если бы мы должны были всегда мыслить фотографию как набор черных точек на белом фоне, мы нашли бы ее совершенно бесполезной в качестве картины.

Точно таким же образом законы механики Ньютона и волновая теория света сохраняют свое значение для большинства практических задач нашей повседневной жизни, хотя мы и знаем, что истина, которую они содержат, не есть полная истина.

На протяжении этой книги я попытаюсь бегло обрисовать путь, на котором открытия последних пятидесяти лет привели нас к расширению и уточнению наших знаний о законах природы, и показать уровень, которого мы теперь достигли.

Говоря об истории, я не буду стремиться следить за развитием в его хронологической последовательности. Конечно, во многих случаях читателю придется пройти через те же самые этапы в рассуждениях, которым следовала физика в своем фактическом развитии, однако в других случаях проще ввести новые идеи на более ранней стадии или сэкономить время, избегнув окольных путей.

ГЛАВА I

ДВИЖЕНИЕ И СИЛА

Законы Ньютона

Механика — самая старая отрасль физики. Она подробно изучается в школе, и, вероятно, большинство читателей хорошо знакомо с ее законами. Но часто забывают, что механика есть часть науки о природе и что ее законы мы выводим из эксперимента. В нашей повседневной жизни и в процессе нашего образования мы свыклись с этими законами и склонны даже считать их не требующими доказательств. В Англии, например, механику часто рассматривают как отрасль математики.

Тем не менее будет полезно кратко изложить в этой главе принципы механики, как потому, что это — наиболее ранний и простейший пример приложения математических методов исследования к явлениям природы, так и потому, что позже мы обсудим изменения в этих принципах, необходимые для применения их к движениям очень малых тел и к движениям с очень большими скоростями. При этом нам придется усомниться в идеях, кажущихся с первого взгляда очевидными и несомненными, и мы должны поэтому хорошо знать факты, на которые эти идеи опирались.

Механика занимается движениями тел и силами, вынуждающими их двигаться. Когда мы говорим: «тело движется», то это лишь иной способ сказать, что меняется его положение в пространстве. Здесь мы сразу встречаемся с понятием быстроты изменения. Так, скорость частицы есть быстрота изменения ее положения в пространстве. В частном случае тела, движущегося равномерно, т. е. с постоянной скоростью, последняя есть отношение пути ко времени, за которое этот путь проходит. На-

пример, на состязаниях для определения скорости бегуна, самолета или лошади время, затрачиваемое на прохождение заранее измеренной дистанции, обычно засекается при помощи секундомера. Однако, если скорость не постоянна, мы будем получать разные результаты в зависимости от величины интервала времени, в течение которого контролируется пробег. В этом случае, чтобы определить скорость в некоторый определенный момент, мы должны представить себе, что при очень аккуратных наблюдениях смогли бы точно измерять малые пути, проходимые за очень короткие промежутки времени. Как сказал бы математик, скорость есть предел отношения пути ко времени при стремлении интервала времени к нулю.

Такое определение быстроты изменения есть основное понятие дифференциального исчисления, или математического анализа. Большинство количественных законов физики можно наилучшим образом сформулировать в виде уравнений, содержащих дифференцирование, или, как их называют, дифференциальных уравнений. Однако мы не предполагаем, что читатель основательно знаком с анализом, и будем избегать им пользоваться, хотя это часто потребует громоздких словесных формулировок тех доводов, которые могли бы быть выражены значительно более просто на языке уравнений. Некоторые же вещи вообще нельзя понять без применения анализа, и их придется опустить совсем.

Хотя мы сможем в некоторой степени избежать формул анализа, нельзя обойтись без понятия быстроты изменения. Но понятие скорости, относящейся к данному моменту времени, теперь уже достаточно привычно. И если, возможно, потребуется напрочь воображение, чтобы представить себе измерения при помощи метода «масштаба и часов» за предельно короткие промежутки времени, то читатель достаточно часто наблюдал изменение скорости автомобиля, показываемое спидометром.

Наиболее фундаментальным законом механики является закон инерции Галилея, который утверждает, что предоставленное самому себе тело будет двигаться с постоянной скоростью в одном и том же направлении.

Этот закон кажется в наши дни едва ли не очевидным, но он полностью противоречит нашему повседневному

опыту, поскольку мы знаем, что тела вообще стремятся остановиться, если прекратилось действие сил, вынуждавших их двигаться. Конечно, это объясняется действием сил трения между данным телом и другими телами или сопротивлением воздуха, и если трение устранить, движение тела продолжается.

Легко показать, что если уменьшить трение, заставив испытываемое тело скользить или катиться по очень гладкой поверхности, и уменьшать сопротивление воздуха, придавая телам подходящую форму или откачивая сосуд, в котором они движутся, согласие с идеальным законом Галилея будет все более полным. Значит, мы были правы; не считая стремление тел останавливаться некоей естественной тенденцией, скрытой в них самих, а приписывая их остановку вторичным причинам.

Когда скорость тела изменяется, т. е. тело движется ускоренно, причиной этого мы считаем некоторую силу. Соотношение между силой и ускорением устанавливается вторым законом Ньютона (первый есть принцип инерции Галилея), который гласит, что сила равна массе, умноженной на ускорение.

Под ускорением мы понимаем быстроту изменения, на этот раз быстроту изменения скорости со временем. В качестве примера можно опять взять автомобиль. Всем нам знакомы ощущения при быстром ускорении (или резком торможении, которое означает ускорение в противоположном направлении), и нетрудно представить себе это ускорение как нечто, выразимое количественно.

Иногда спорят по поводу того, является ли второй закон Ньютона определением силы или массы или формулировкой объективного факта. В действительности он есть смесь того и другого. Это весьма типичная для физического закона ситуация, и она заслуживает поэтому более подробного объяснения.

Закон Ньютона утверждает прежде всего, что ускорение данного тела под действием данной силы всегда одно и то же, независимо от того, как быстро тело движется, и независимо от таких обстоятельств, как географическое положение, время года, температура и прочее.

Такое утверждение могло бы быть подтверждено или опровергнуто экспериментом. Далее закон утверждает,

что ускорения разных тел под действием одной и той же силы пропорциональны друг другу. Пусть, например, тело *A* получает под действием некоторой определенной силы вдвое большее ускорение, чем другое тело *B*. Тогда, если мы приложим к ним другую силу, ускорение тела *A* осталось бы все равно вдвое большим, чем ускорение тела *B*. Это снова определенное утверждение. На этом пути можно сопоставить каждому телу величину, называемую его инерцией, и определять отношение величин инерции двух тел из эксперимента. Проведя это, мы нашли бы, что инерция аддитивна, т. е. если соединить два тела вместе, инерция образовавшегося тела будет равна сумме инерций его составных частей. Целесообразно поэтому использовать вместо термина «инерция» термин «масса», которая тем самым и определяется, однако в произвольной шкале. Чтобы устранить произвол, мы должны выбрать некоторое тело и назвать его массу килограммом или фунтом, тогда массы других тел выразятся в долях этой единицы.

Все наши рассуждения относились к некоторой данной силе, и внимательный читатель мог бы заметить, что для справедливости такой аргументации необходимо, чтобы мы умели прилагать равные силы к разным телам. Это было бы очень трудно сделать без помощи третьего закона Ньютона, утверждающего, что действие равно противодействию, или, иными словами, если тело *A* действует с некоторой силой на тело *B*, то тело *B* действует на тело *A* с равной по величине и противоположно направленной силой. Третий закон можно рассматривать как часть определения силы, ибо без него было бы весьма трудно сравнивать силы между собой. Используя этот закон, мы в состоянии теперь решить многие задачи, в которых тела различных масс взаимодействуют друг с другом, и тем самым фактически провести обсуждавшееся сравнение сил.

Мы находим также, что различные силы аддитивны, т. е. если две силы действуют вместе на данное тело в одном направлении, то ускорение равно сумме ускорений, которые были бы созданы каждой силой в отдельности. Например, когда две лошади тянут телегу и их силы одинаковы, ускорение телеги будет вдвое большим,

чем создала бы одна лошадь. Это снова экспериментальный факт, и он помогает показать целесообразность определения силы.

До сих пор мы не обращали внимания на направление скорости, ускорения или силы. Но в действительности они направленные величины, векторы. Когда мы говорим о силе, мы должны задать ее величину и направление. Точно так же, говоря о сложении двух сил, приложенных не обязательно в одном направлении, мы подразумеваем под суммой результирующую силу, которая получается, когда эти две силы ускоряют тело одновременно.

Читатель, возможно, помнит, что результирующая сила может быть построена, если нарисовать сначала стрелку в направлении первой силы, причем длина стрелки соответствует величине силы, и затем из конца первой стрелки провести вторую, соответствующей длины, в направлении второй силы. Тогда линия, соединяющая начало первой и конец второй стрелок, и дает направление и величину результирующей силы. Это построение, изображенное на рис. 1, известно под названием треугольника сил. Дополнив полученный треугольник до параллелограмма, мы получим другую форму этого правила — «параллелограмм сил».

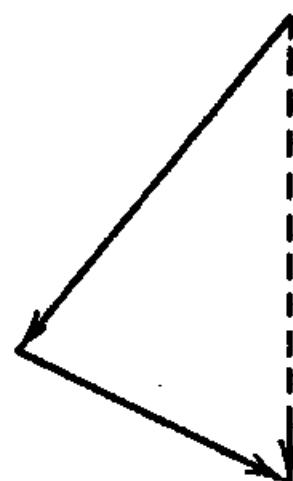


Рис. 1. Сложение сил.

Такое же правило применяется для сложения скоростей. Откладывая одну из двух скоростей в противоположном направлении, мы можем тем же путем получить разность скоростей.

Подобным же образом мы должны интерпретировать быстроту изменения скорости — ускорение, входящее в закон Ньютона. Следовательно, тело движется ускоренно и тогда, когда его скорость постоянна по величине, но меняет направление. Чтобы заставить тело двигаться по искривленному пути с постоянной скоростью, необходимо приложить силу. Например, пассажир в автомобиле, быстро движущемся вдоль изгиба дороги, вполне ощущает силу, действующую на него со стороны сидения или бортов.

Ускорение тела, движущегося по кривой с постоянной скоростью, равно $\frac{v^2}{r}$, где v — скорость, а r — радиус кривизны. Этот результат можно получить, если рассмотреть скорости частицы в два последовательных момента времени и взять их разность по правилу треугольника или параллелограмма сил, но он очевиден из того факта, что размерность ускорения есть скорость, деленная на время, или, иными словами, путь, деленный на квадрат времени. $\frac{v^2}{r}$ есть единственная комбинация из скорости и радиуса кривизны, удовлетворяющая этому требованию. Это ускорение образует прямой угол с направлением движения в данный момент и направлено к центру кривизны.

Чтобы заставить тело двигаться вдоль кривой, требуется сила, приложенная в том же направлении и равная $\frac{mv^2}{r}$, где m — масса тела.

Хотя эта сила направлена к центру кривизны, ее иногда называют центробежной силой. Происходит это потому, что согласно третьему закону Ньютона сила, с которой тело действует на какое-нибудь другое тело, заставившее его двигаться по искривленному пути, как раз направлена от центра кривизны траектории. Поэтому, в то время как сидение автомобиля, резко поворачивающего влево, действует на нас с силой, толкающей также влево, реакция нашего тела направлена вправо и, таким образом, от центра кривизны.

Объяснением того, что понимают под ускорением, мы заканчиваем наш обзор основных законов механики. Для многих практических приложений следует, конечно, присоединить к этим общим законам описание конкретных сил и некоторых ограничений, которые могут быть наложены на движение рассматриваемых тел.

Тяготение и другие силы

Наиболее важной из всех сил, играющих роль в проблемах, с которыми сталкивается механика в повседневной жизни, является сила тяготения. Она действует вертикально вниз, и ее величина пропорциональна массе, так

что под влиянием тяготения все тела падают с одинаковым ускорением.

Это другой пример, когда простые общие законы природы кажутся противоречащими здравому смыслу. Мы интуитивно свыклись с тем фактом, что камень всегда падает быстрее клочка бумаги, и не можем увидеть здесь действия общего закона, пока мы не поняли, что причина более медленного падения бумаги лежит в сопротивлении воздуха, действующего на бумагу сильнее, чем на камень. Иными словами, знакомое явление падения тел в воздухе довольно сложно. Мы можем надеяться, что простые законы будут иметь место в случае падения тел в пустом пространстве. Можно приблизиться к этим идеальным условиям, наблюдая падение в откачанной трубке.

Тот факт, что сила тяготения, действующая на тело, т. е. вес тела, точно пропорциональна его массе, или инерции, пока является для нас неожиданным совпадением. Как мы увидим далее, в общей теории относительности этот факт привел к новому пониманию природы тяготения.

Ньютон также открыл, что сила, которая заставляет тела падать на землю, есть частный случай общего притяжения между двумя любыми массами и что это же притяжение является причиной, удерживающей Землю и другие планеты на их пути вокруг Солнца. Мысль, что большие силы притяжения все-таки не приводят к падению Земли на Солнце или Луны на Землю, снова противоречит нашей интуиции, ибо мы не привыкли иметь дело с объектами, подверженными настолько малым силам трения, что они могут миллионы лет сохранять свои скорости. Как мы видели, тело действительно способно вращаться по круговой орбите вокруг притягивающего центра, если сила притяжения имеет точно такую величину, чтобы создать ускорение, соответствующее кривизне орбиты. Мы видели, что такая сила есть $\frac{mv^2}{r}$. Для данного радиуса r и данной силы притяжения всегда существует тогда скорость, при которой возможно устойчивое движение.

Орбиты планет не являются точно окружностями, и полное описание движения планет потребовало бы гораздо большего использования математики, чем мы обе-

щали. Однако они мало отличаются от окружностей, и эта разница не затрагивает существа проблемы. Если сопоставить периоды обращения различных планет с их расстояниями от Солнца, наблюдение покажет, что квадрат периода изменяется пропорционально кубу радиуса. Вспоминая, что скорость v равна длине окружности $2\pi r$, деленной на время обращения t , мы выведем из этого наблюдения, что сила меняется обратно пропорционально квадрату расстояния до центра.

Рассуждения, подобные этим, привели Ньютона к формулировке закона всемирного тяготения, согласно которому два тела с массами m и M , удаленные друг от друга на расстояние r , будут притягиваться с силой $\gamma \frac{mM}{r^2}$, где γ — постоянная тяготения. Как показал Ньютон, закон всемирного тяготения объясняет законы Кеплера для движения планет. Тот же закон с той же самой постоянной γ дает правильную величину силы тяжести на поверхности земли.

Более поздние исследования показали также, что малые отклонения от точных кеплеровских орбит могут быть объяснены притяжением планет друг к другу; отклонения особенно сильны, когда планеты сближаются на сравнительно малые расстояния. Все это свидетельствует об очень широкой применимости закона «обратных квадратов».

Не так просто определить постоянную γ в этом законе, поскольку мы не имеем прямого метода измерения массы Солнца и других планет. Единственным способом определения γ является измерение силы притяжения к какому-нибудь большому телу, вес которого точно известен. Это и сделал Кэвендиш, наблюдая отклонение чувствительных весов при поднесении большого свинцового шара близко к одной из гирь. Зная из опыта величину γ , мы можем тогда по орбитам планет вычислить массу Солнца или Земли.

Мы подробно обсудили закон тяготения как потому, что он играл большую роль в развитии ньютоновской механики, так и потому, что мы имеем здесь старейший пример силы, которая удовлетворяет общему и простому закону.

Имеются, однако, силы многих других типов. Если бы эта глава служила введением к учебнику механики, мы дали бы подробное описание сил, важных в механических приложениях. Примером служат силы, действующие между соприкасающимися телами, в том числе контактные напряжения и силы трения; упругие силы, стремящиеся вернуть телу его прежние форму и размеры, к которым относятся и силы в сжатой пружине, движущей часы. Далее имеются силы, обязанные давлению в жидкостях и газах, в том числе силы плавучести, которые удерживают корабль на поверхности, и силы давления пара в паровозе или горячих газов в двигателе автомобиля.

Мы увидим позднее, что все силы этого рода связаны со структурой материи и могут быть объяснены, если известны принципы ее строения. Так как материя состоит из атомов; эти силы являются в конечном счете следствием сил, действующих между атомами.

Кроме перечисленных, существует еще один вид сил, играющих роль в нашей повседневной жизни, именно, электрические и магнитные силы, которые мы обсудим в следующей главе.

Импульс и энергия

В дальнейших рассуждениях нам будет удобно ссылаться на некоторые другие законы механики, которые являются следствием законов Ньютона. Один из них есть закон сохранения количества движения или импульса. Под импульсом тела мы понимаем произведение его массы на скорость. Поэтому быстрота изменения импульса равна массе, умноженной на быстроту изменения скорости, т. е. точно равна силе, действующей на тело.

Рассмотрим два взаимодействующих тела A и B (например, они могут притягиваться друг к другу). Тогда быстрота изменения импульса тела A равна силе, с которой B действует на A , а быстрота изменения импульса B есть сила, действующая на B со стороны A . Согласно закону действия и противодействия эти две силы равны по величине и противоположно направлены, следова-

тельно, в каждый данный момент времени изменения импульсов A и B противоположны по знаку, т. е. сумма импульсов постоянна. Сумму здесь следует, конечно, понимать в смысле правила треугольника или параллелограмма.

Легко видеть, что этот результат может быть распространен на произвольное число тел при условии, что все действующие силы есть силы взаимодействия между телами, а внешние силы отсутствуют.

Мы установили, таким образом, закон сохранения импульса: если действующие в механической системе силы суть силы взаимодействия ее частей друг с другом, импульс всей системы остается постоянным.

В частном случае двух малых тел равной массы сумма их импульсов есть $mv_1 + mv_2 = m(v_1 + v_2) = 2m \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)$.

Выражение в скобках есть их средняя скорость, или, что то же самое, скорость точки, всегда находящейся посредине между ними. В этом частном случае мы можем поэтому утверждать, что, каковы бы ни были силы, действующие между двумя телами,² точка, находящаяся на половине расстояния между ними, всегда будет двигаться прямолинейно и с постоянной скоростью. Если частицы имеют разные массы, это утверждение останется справедливым для точки, называемой центром масс. Ее положение может быть вычислено следующим образом: если два тела движутся вдоль прямой линии и находятся на расстояниях x_1 и x_2 от фиксированной точки, то их центр

масс находится на расстоянии $x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$ от той же фиксированной точки. Легко видеть, что центр масс лежит ближе к более тяжелому из двух тел. Таким же путем можно определить центр масс более чем двух тел. Полный импульс системы равен всегда Mv_c , где M — полная масса, а v_c — скорость центра масс.

Следующим важным понятием, которое мы обсудим, является понятие энергии. Рассмотрим прежде всего тело, падающее свободно под влиянием тяготения, и предположим снова, что его трением о воздух можно пренебречь. Спросим себя, каково соотношение между расстоянием, пройденным телом при падении, и приобре-

таемой при этом скоростью. Было бы очевидной ошибкой предположить, что скорость возрастает пропорционально расстоянию, так как сила тяжести постоянна, и поэтому согласно закону Ньютона скорость тела растет пропорционально времени. Другими словами, скорость тела увеличивается каждую секунду на одну и ту же величину. Но если возрастает скорость, то возрастает и путь, проходимый за секунду, и поэтому одинаковое возрастание скорости происходит на все увеличивающемся расстоянии. Другими словами, скорость возрастает медленнее, чем пропорционально расстоянию.

Этому утверждению можно дать количественное выражение следующим образом. Предположим, в момент времени t_1 тело имело скорость v_1 , а в очень близкий к нему момент t_2 — скорость v_2 . Второй закон Ньютона гласит, что $v_2 - v_1 = g(t_2 - t_1)$, где g — постоянное ускорение тяготения. Тогда, если в первый момент расстояние от исходной точки есть s_1 , а во второй момент s_2 , мы получим: $s_2 - s_1 = v(t_2 - t_1)$. Какую же скорость v мы должны подставить в это уравнение? Так как скорость частицы не постоянна и в начале меньше, чем в конце, разумно использовать среднее за этот интервал времени значение скорости, т. е. $\frac{1}{2}(v_1 + v_2)$. Это рассуждение всегда приближенно верно для очень малого интервала времени. Оно оказывается точным для любой величины интервала в случае постоянного ускорения, что мы и предположили. Выражая поэтому в нашем исходном уравнении $t_2 - t_1$ через пройденный путь, мы легко найдем:

$$\frac{1}{2}(v_1 + v_2)(v_2 - v_1) = g(s_2 - s_1),$$

или, перемножая первые две скобки,

$$\frac{1}{2}v_2^2 - \frac{1}{2}v_1^2 = g(s_2 - s_1).$$

Иными словами, не скорость, а половина квадрата скорости возрастает на ту же величину, когда тело проходит одинаковые расстояния. Используя тот факт, что сила есть масса, умноженная на ускорение, результат можно написать в виде: $\frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = F(s_2 - s_1)$.

где F — сила. Рассмотрим некоторый участок пути, и пусть несколько тел, начавших падать с разных высот, проходят этот участок при своем падении. Тогда у тех из них, которые двигались дольше и, следовательно, имеют большую скорость, при прохождении этого участка скорость будет возрастать медленнее, однако величина $\frac{1}{2}mv^2$ возрастет одинаково для всех тел.

Из этого можно непосредственно вывести некоторые полезные заключения. Предположим, например, что я бросаю тело вертикально вверх и жду его возвращения. Спрашивается, с какой скоростью оно ко мне вернется? Ответ (снова отвлекаясь от сопротивления воздуха): с той же самой скоростью, с какой я его бросил, исключая, конечно, разницу в направлениях. Это можно представить себе таким путем: я могу вообразить, что следуя за телом в его подъеме и отмечаю каждый дюйм его пути. Когда оно проходит какой-нибудь определенный дюйм, $\frac{1}{2}mv^2$ уменьшается на некоторую величину (а именно на F , умноженную на 1 дюйм); когда затем тело проходит тот же самый дюйм при падении, $\frac{1}{2}mv^2$ снова возрастает на ту же величину. Следовательно, при падении до исходной точки $\frac{1}{2}mv^2$ увеличилась на столько же, на сколько уменьшилась при подъеме, и должна была вырасти до значения, какое имела в начальный момент.

Величина $\frac{1}{2}mv^2$ называется кинетической энергией. Такие названия для механических величин по своему происхождению до некоторой степени произвольны, и не следует пытаться приписывать им какое-нибудь значение, в котором слово используется не в области техники. Например, выражение «очень энергичный человек», вероятно, более соответствует механической концепции силы, чем энергии.

Мы выяснили, следовательно, что кинетическая энергия свободно падающего тела возрастает при прохождении им пути s на величину Fs , где F — сила. Или, если оно поднимается на высоту h , его кинетическая энергия уменьшается на Fh , так что независимо от того, падает

или поднимается тело, сумма $\frac{1}{2}mv^2 + Fh$ остается постоянной. Это есть частный случай закона сохранения энергии. В то время как мы называли первое слагаемое кинетической энергией, второе слагаемое, Fh , называется потенциальной энергией.

Как изменится этот результат, если мы будем иметь дело не с тяготением, а с какой-нибудь другой силой? Прежде всего замечаем, что другие силы в общем случае в разных точках пространства имеют разную величину. Ограничимся пока случаем тела, движущегося по прямой линии, и предположим, что сила, действующая на тело в данной точке, не зависит от скорости, с какой оно через эту точку проходит. Тогда мы можем использовать соотношение $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = F(s_1 - s_2)$ для очень малых участков пути, на которых сила может считаться постоянной. Выражение в правой стороне равенства называется работой, произведенной силой F . Если тело проходит некоторый конечный участок пути, то, чтобы вычислить произведенную при этом работу, нужно сложить работу этой силы на различных малых участках. Когда тело движется из некоторой точки, а затем возвращается обратно, то на своем пути оно проходит каждый интервал дважды в противоположных направлениях, и возрастание кинетической энергии при движении в одном направлении компенсируется убыванием при прохождении в противоположном. Следовательно, снова оказывается верным утверждение, что тело вернется в исходную точку с начальной скоростью.

Силы, для которых это утверждение справедливо, называются консервативными, так как для них выполняется закон сохранения энергии. Мы можем теперь определить потенциальную энергию в данной точке как работу, произведенную телом при движении из этой точки до некоторой точки отсчета. Поскольку единственной целью для введения потенциальной энергии является сравнение ее величины в разных точках, ясно, что однозначно определяется только разность в величине потенциальной энергии, и ее можно отсчитывать от совершенно произвольной начальной точки.

Однако существуют, очевидно, силы, которые неконсервативны, в частности силы, зависящие от скорости тела. Примером такой силы является трение, так как его действие всегда противоположно направлению движения тела. Если тело катится по поверхности стола, то при прохождении некоторого пути оно потеряет часть своей скорости, и если в своем движении оно вернется в исходную точку по тому же пути, потери в кинетической энергии не только не возместятся, но, напротив, еще увеличатся. Этот факт свидетельствует о том, что зависящие от скорости силы не могут быть консервативными (для тел, движущихся по прямой линии), поскольку в каком бы направлении и с какой бы скоростью тело ни проходило через данную точку, изменения в его кинетической энергии никогда не скомпенсируются.

Неконсервативные силы могут привести не только к уменьшению, но и к возрастанию кинетической энергии. Пар действует на поршень паровой машины как раз с силой подобного рода. Паровая машина устроена так, что пар давит на поршень, когда он выходит из цилиндра, во время же обратного хода пар выключается и давление, препятствующее движению, делается меньше.

Если мы перейдем от случая движения по прямой линии к более общему, уже не будет верным утверждение, что силы, зависящие только от положения в пространстве, обязательно консервативны. Это можно увидеть из следующего примера. Поместим тело в поток воздуха, создаваемый ветром, дующим над равниной, причем скорость ветра равна нулю на поверхности земли и возрастает с высотой. Предположим, далее, что ветер действует на тело с силой, зависящей только от его скорости в данной точке и, следовательно, только от того, где это тело в данный момент находится. Укрепим теперь тело на конце веревки и начнем вращать в вертикальной плоскости так, чтобы внизу окружности оно двигалось против ветра. Тогда в верхней части окружности тело движется по ветру и ветер совершает положительную работу, т. е. кинетическая энергия тела увеличивается. В нижней половине окружности тело движется в противоположном направлении и ветер, следовательно, будет препятствовать его движению. Но согласно нашему предположению

ветер внизу слабее, чем наверху, и потеря в кинетической энергии здесь будет меньше, чем выигрыш в верхней половине. Поэтому в идеальных условиях тело выигрывало бы в энергии при каждом обороте и его скорость увеличивалась бы до тех пор, пока не стала бы сравнимой со скоростью ветра, когда уже не разумно предположение, что давление ветра зависит только от положения тела и не зависит от его скорости.

Сила, следовательно, неконсервативна (несмотря даже на то, что зависит только от положения), если совершает некоторую работу над телом, когда последнее описывает замкнутую петлю. Эта величина, работа на замкнутом, пути, называется циркуляцией. Различие между консервативными и неконсервативными силами будет для нас особенно важно в дальнейшем.

Таким образом, пока мы ограничиваемся чисто механическими проблемами, закон сохранения энергии оказывается справедливым только в некоторых очень специальных случаях и как раз очень редко в реальных практических задачах, таких как двигатели, являющиеся источниками механической энергии, а также трение и другие виды сил сопротивления, которые поглощают механическую энергию.

Ситуация, однако, полностью меняется, если мы учтем тот факт, что механическая энергия — только одна из многих форм энергии. Например, оказывается, что при торможении и остановке автомобиля, когда уничтожается его кинетическая энергия, в его тормозной системе выделяется теплота. С того времени, как в науке о теплоте, которой мы коснемся в последующих главах, были разработаны количественные методы и стало возможным измерение количества тепла, выяснилось, что при уничтожении определенного количества механической энергии возникает всегда одно и то же количество теплоты. Значит, механическая и тепловая энергии превращаются друг в друга в определенной пропорции. Если мы просто назовем тепловой энергией тепловой эквивалент определенного количества механической энергии, то трение уже не будет уничтожать энергию, а лишь превращать механическую энергию в тепловую. Напротив, паровая машина превращает тепловую энергию в механическую, но,

как мы увидим позднее, это еще не все, что можно сказать об этой проблеме, так как, оказывается, гораздо проще превратить механическую энергию в тепловую, чем обратно.

Существуют и другие формы энергии, например химическая. При горении угля, т. е. при соединении углерода и кислорода в двуокись углерода, тепловая энергия возникает, казалось бы, из ничего. Закон сохранения энергии будет выполнен, если мы предположим, что вещество обладает химической энергией, определяемой его химическим строением, и что химическая энергия кислорода и углерода в отдельности больше, чем энергия продукта горения, двуокиси углерода. Другими словами, горение превращает химическую энергию в тепловую. Точно так же электрическая батарея превращает химическую энергию в электрическую, электромотор — электрическую в механическую, а электронагреватель — электрическую в тепловую.

Все эти формы энергии поддаются количественному измерению, и при всех известных процессах их превращения друг в друга энергия всегда сохраняется. Когда мы перейдем к обсуждению развития современной физики, мы встретимся со многими новыми формами энергии. Однако мы ни разу не будем вынуждены отказаться от принципа сохранения энергии, хотя и обсудим один случай, где остается место для некоторых сомнений. Вероятно поэтому, что сохранение энергии есть универсальный закон природы, хотя, как и в отношении других эмпирических законов, мы должны быть готовы к сомнению, если обнаружатся новые явления, которые ему противоречат. Однако по отношению к закону с такой широкой областью применимости эти возражения должны быть очень сильны и очень убедительны, чтобы их можно было бы принять.

Столкновения

Законы сохранения энергии и импульса удобны, в частности, для исследования одного типа механических процессов, а именно столкновений. Так как изучение столкновений атомных частиц будет впоследствии для

нас очень важным, мы посмотрим теперь, как эти законы сохранения применяются в простых случаях.

Рассмотрим сначала тело, пусть это будет бильярдный шар массы m , движущийся со скоростью v и сталкивающийся с другим таким же шаром, который до удара покоился (мы ограничимся пока случаем так называемого центрального или лобового удара, при котором первый шар движется вдоль линии, соединяющей его центр с центром второго). При столкновении тела приходят в соприкосновение на очень короткий промежуток времени, зависящий от изменения их размеров и формы, т. е. от их упругих свойств. Представим на минуту, что мы имели бы дело не с бильярдными шарами, а с воздушными. Тогда мы увидели бы, что после первого прикосновения они продолжают двигаться дальше навстречу друг другу; часть их оболочки, которой они соприкасаются, становится плоской, и эта область соприкосновения растет, так что шары имеют общий участок поверхности. Сила, с которой газ в каком-либо шаре давит на этот участок, делается поэтому все больше и больше. Под ее действием скорости шаров сравниваются, и в конце концов они снова расходятся.

Ситуация для бильярдных шаров в точности такая же, но поскольку они гораздо более тверды, область соприкосновения остается очень малой, а время соударения становится очень кратким. Вследствие этого между шарами должны действовать значительные силы, которые в состоянии изменить их движение за очень малое время, т. е. создать большие ускорения. Обычно оказывается возможным забыть обо всех других силах, таких как тяготение, могущих действовать на шары во время удара, так как изменения в скорости, произведенные ими за столь малое время, очень незначительны. И мы можем рассматривать движение шаров в пределах этого интервала, как если бы не действовало никаких сил, кроме контактных.

В такой ситуации приложим закон сохранения импульса, потому что нет никаких других сил, кроме сил взаимодействия. Импульс непосредственно перед столкновением mv должен, следовательно, равняться полному импульсу после столкновения $m(u_1 + u_2)$, где u_1 и u_2 —

скорости шаров. Они направлены по одной прямой, поскольку мы рассматриваем центральный удар. Иными словами, закон сохранения импульса требует в нашем случае, чтобы сумма скоростей шаров после столкновения равнялась начальной скорости первого шара. Результат соударения сильно меняется, смотря по тому, переходит при этом механическая энергия в тепло или нет. Это в свою очередь зависит от материала, из которого изготовлено тело. Биллиардные шары достаточно хорошо удовлетворяют идеальным условиям абсолютно упругого удара, не сопровождающегося выделением тепла, и мы полагаем, что при их столкновении механическая энергия остается неизменной (правда, во время удара часть механической энергии переходит в упругую, а затем обратно, но нам нет никакой нужды рассматривать это более подробно). Таким образом, кинетическая энергия непосредственно перед столкновением точно равна энергии после столкновения, и мы можем написать равенство:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m u_1^2 + \frac{1}{2} m u_2^2.$$

Сокращая общий множитель $\frac{1}{2} m$ и используя результат, следующий из сохранения импульса, перепишем его как $u_1^2 + u_2^2 = (u_1 + u_2)^2$. Применяя к правой части известную алгебраическую формулу, получим окончательно:

$$u_1^2 + u_2^2 = u_1^2 + u_2^2 + 2u_1 u_2,$$

что возможно, лишь если $u_1 u_2$ равно нулю. Произведение двух сомножителей обращается в нуль только в случае обращения в нуль одного из сомножителей. Итак, либо u_1 , либо u_2 равно нулю и, следовательно, один из шаров должен остаться на месте после столкновения. Так как, далее, u_1 и u_2 в сумме дают v , то после удара другой шар будет двигаться со скоростью v . Таковым не может быть первый, ибо для этого ему пришлось бы пройти сквозь второй, значит, первый шар остановится, а второй начнет двигаться дальше со скоростью v .

В наших рассуждениях мы очевидным образом использовали факт равенства масс. Поэтому, наблюдая, остановится ли первый шар после столкновения, мы можем

выяснить, равны ли в точности массы двух шаров. Это хорошо иллюстрирует сделанное мною ранее утверждение, что третий закон Ньютона, требующий сохранения импульса, позволяет сравнивать результаты действия одинаковой силы, приложенной к разным телам, и тем самым сравнивать массы тел, не измеряя самой силы.

Другим предельным случаем является столкновение абсолютно неупругих тел, когда вся энергия, затраченная на упругую деформацию, без остатка превращается в тепло. Ясно, что шары будут продолжать сближаться только до тех пор, пока не прекратится их относительное движение. При столкновении одинаковых абсолютно неупругих тел, хорошим примером которых могут служить комки снега или глины, мы ожидаем, что скорости их после удара окажутся одинаковыми и вследствие сохранения импульса равными половине начальной скорости v .

До сих пор речь шла только о центральном ударе, при котором шары после столкновения двигались вдоль той же прямой линии, что и первый шар до удара. Рассмотрим теперь более общий случай, схематически изображенный на рис. 2, а. Видно, что сила, действующая на шар 2, уже не стремится продвинуть его точно в вертикальном направлении, а скорее отталкивает несколько вправо; шар 1 при этом отклоняется влево, как показано верхней стрелкой. Как снова утверждает закон сохранения импульса, сумма скоростей шаров после столкновения должна равняться v , но теперь сумму следует понимать в смысле сложения направленных величин, векторов, т. е. в смысле правила треугольника. Далее, если шары абсолютно упруги, мы снова имеем $v^2 = u_1^2 + u_2^2$ и треугольник, изображенный на рис. 2, б, оказывается таким, что сумма квадратов двух его сторон равна квадрату третьей. Это — утверждение теоремы Пифагора, справедливой только для прямоугольных треугольников, а значит, u_1 и u_2 составляют друг с другом прямой угол. Следовательно, если

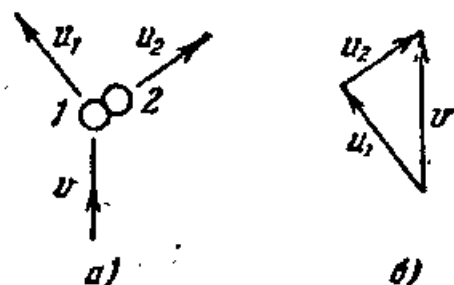


Рис. 2. а — нецентральный соударение бильярдных шаров; б — треугольник скоростей при таком столкновении.

движущееся тело сталкивается абсолютно упругим образом с покоящимся телом такой же массы, то, как показывают законы сохранения энергии и импульса, эти тела после соударения расходятся под прямым углом друг к другу.

Прежде чем закончить вопрос о бильiardных шарах, я хотел бы заметить, что наши выводы нельзя неосторожно прилагать к происходящему в действительности на столе бильiardа, так как на нем шары катятся, т. е. движутся и вращаются одновременно. Правда, это незначительно усложняет проблему и мало меняет результаты.

Момент количества движения

В дальнейшем мы будем пользоваться еще одним важным механическим понятием — моментом количества движения. Следует прежде всего выяснить, что же такое момент вообще. Момент в своем простейшем виде появляется в механике твердого тела, хотя сами по себе твердые тела нас не интересуют.

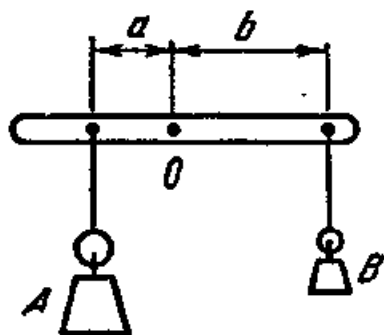


Рис. 3. Рычаг.

Все знают, что тело, укрепленное на шарнире, гораздо легче повернуть, если сила приложена как можно дальше от точки опоры.

Важным применением этого правила является рычаг, изображенный на рис. 3. Два груза A и B укреплены на расстояниях a и b соответственно от шарнира O . Как известно, силы находятся в равновесии, т. е. не стремятся повернуть рычаг в какую-нибудь сторону, если вес A , умноженный на расстояние a от опоры до точки подвеса, равен такому же произведению для груза B . Поэтому произведением силы на расстояние измеряется ее способность повернуть тело вокруг фиксированной оси. Для этого произведения и применяется термин «момент». Способ сравнения различных сил по их моментам используется в некоторых типах весов.

На рис. 3 был изображен специальный случай, когда оба груза подвешены к горизонтальному рычагу и, следовательно, силы, действующие на рычаг, составляют

с ним прямой угол. Силу, действующую в произвольном направлении, можно разложить на составляющую, перпендикулярную к рычагу, и составляющую, параллельную ему. Составляющая силы, направленная вдоль рычага, не будет поворачивать его вокруг оси. На рис. 4 веревка, поддерживающая груз, перекинута через блок и образует с рычагом одну линию. Здесь также сила, с которой действует веревка, не стремится повернуть рычаг. Итак, мы определим момент силы относительно оси как произведение расстояния на поперечную составляющую силы, где под поперечной составляющей понимается составляющая, направленная под прямым углом к расстоянию до оси.

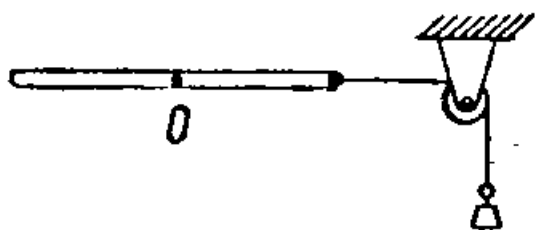


Рис. 4. Момент отсутствует.

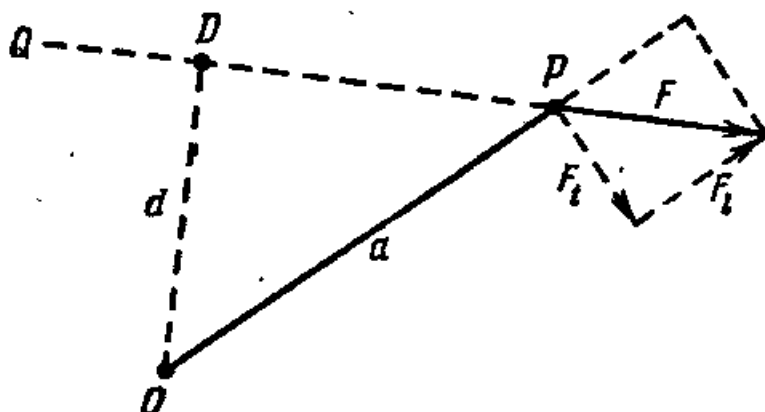


Рис. 5. Момент в общем случае.

Рис. 5 иллюстрирует сказанное. Стрелка F показывает величину и направление силы, действующей на тело в точке P на расстоянии a от оси O . По правилу треугольника она разложена на поперечную составляющую F_{\perp} , перпендикулярную к OP , и на продольную F_{\parallel} . Момент силы F относительно оси O равен тогда aF_{\perp} .

Момент силы можно выразить и другим способом. Рассмотрим пунктирную линию Q на рис. 5, которая проходит через P в направлении силы (ее обычно называют линией действия этой силы), и опустим из O перпендикуляр на эту линию. Тогда момент запишется в виде Fd , где d — длина перпендикуляра.

будут отличаться только знаком, и момент импульса P под действием силы со стороны Q уменьшится ровно на столько же, на сколько увеличится момент импульса Q . Все сказанное останется справедливым для сил отталкивания и для любого числа тел.

Мы пришли, таким образом, к следующему закону сохранения момента количества движения: если внутри механической системы, способной вращаться вокруг некоторой оси, не действуют никакие силы, кроме сил взаимодействия между ее частями, момент количества движения этой системы остается постоянным. Закон справедлив и в присутствии внешних сил, при условии, что они не создают момента относительно оси, т. е. действуют на саму ось или приложены в направлении к оси или от нее.

Между прочим, мы в состоянии теперь вывести из закона Ньютона те правила равновесия рычага, которые послужили отправным пунктом для наших рассуждений. Действительно, для того чтобы рычаг не начал двигаться, моменты всех действующих на него сил должны уравновеситься. Так как, далее, сила, действующая на шарнир, не создает момента, $aA - bB$ должно быть равно нулю.

Закон сохранения момента количества движения является полезным инструментом при решении многих динамических задач. Он особенно важен при рассмотрении вращения твердых тел вокруг своей оси, например при изучении вращения волчка или механики игры в крокет, однако эти приложения трудно описать, не используя математики, а в некоторых случаях связанные с ними вопросы выходят за рамки этой книги. Сохранение момента количества движения используется также при исследовании движения тел в поле сил, например движения планет вокруг Солнца. Оно дает простой способ доказательства устойчивости такого движения. Предположим, что в некоторый момент планета находится на расстоянии r от Солнца и движется со скоростью v в поперечном направлении, т. е. под прямым углом к линии, соединяющей ее с Солнцем. Тогда ее момент количества движения равен, по определению, $mv r$. Далее, в этом случае момент количества движения должен быть постоянным, так как сила притяжения направлена к Солнцу и не создает момента относительно него.

Допустим, что в дальнейшем планета переместилась в некоторую точку, находящуюся гораздо ближе к Солнцу, на расстоянии a от него. Из-за сохранения момента количества движения мы имеем: $mvr = mu_1 a$, где u_1 — поперечная составляющая скорости в этой точке. Иными словами, $u_1 = \frac{vr}{a}$, и, поскольку полная скорость не может быть меньше, чем ее поперечная составляющая, скорость планеты увеличится по сравнению со скоростью в первой точке по крайней мере в отношении $\frac{r}{a}$. Когда планета подходит все ближе и ближе к Солнцу, ее скорость должна была бы возрастать не медленнее, чем обратно пропорционально расстоянию, а ее кинетическая энергия, содержащая квадрат скорости, — обратно пропорционально квадрату расстояния. Это, однако, несовместимо с сохранением энергии. Если мы выведем выражение потенциальной энергии, связанной притяжением Солнца, т. е. выражение работы, которую совершает сила тяготения над планетой при ее движении из одной точки в другую, окажется, что потенциальная энергия отрицательная и меняется лишь обратно пропорционально расстоянию. Иными словами, из-за сохранения энергии планета не может на очень малых расстояниях от Солнца иметь кинетическую энергию такой величины, какую согласно закону сохранения момента количества движения она должна была иметь, если бы действительно там оказалась. Отсюда следует, что в своем движении планета не приблизится к Солнцу на очень малое расстояние и, в частности, никогда на него не упадет. Это будет справедливо до тех пор, пока столкновения с другими планетами или трение о вещество в межпланетном пространстве не создадут сил, моменты которых заметно изменяют момент количества движения планеты.

Устойчивость планетных орбит можно объяснить и другим способом. Когда планета приближается к Солнцу, возрастает ее поперечная скорость, а с нею и центробежная сила, которая сопровождает ее движение по окружности. Но так как сила притяжения не возрастает при этом в такой же степени, планета в действительности будет двигаться не по окружности, кривизна ее

орбиты будет меньше кривизны окружности и, следовательно, ее расстояние от Солнца будет снова увеличиваться.

Начальные условия и степени свободы

Имеется еще одна черта законов механики, к которой я хочу привлечь здесь внимание. Законы Ньютона позволяют нам выразить ускорение тела, т. е. быстроту изменения его скорости, через действующие на него силы. Но они не говорят ничего ни о том, где находится тело, ни каковы его скорость и направление движения. Только если мы знаем положение и скорость в некоторый начальный момент, законы определяют, как изменятся они в дальнейшем или как изменялись в предшествующие моменты времени, а тем самым и полностью определяют движение тела. Для полного решения механической задачи требуются, таким образом, два рода информации. К первому относятся общие законы, а именно законы Ньютона, и сведения о действующих силах и их зависимости от положения и скорости. Такая информация называется уравнениями движения. К этому мы должны добавить, например, некоторые данные о положении и скорости тела в начальный момент. Все это обычно относят к «начальным условиям».

Такая постановка механических задач не является единственно возможной. Иногда вместо того чтобы задать местонахождение и скорость в начальный момент, определяют лишь часть этих величин, но зато требуют, чтобы по окончании движения тело попало в определенную точку пространства. Например, мы можем спросить себя, в каком направлении нужно выстрелить из ружья, чтобы пуля поразила заданную мишень. Здесь мы знаем начальную точку и величину начальной скорости, но не ее направление. Взамен мы задали точку, которой должна достичь пуля. Все это вместе с уравнениями движения снова полностью определяет задачу. Такого рода информация, не относящаяся исключительно к начальному моменту, называется более общо граничными условиями. Разделение на уравнения движения и граничные условия имеет место и во всех других отраслях физики.

Мы можем спросить тогда, каким числом данных мы должны обладать, чтобы определить нашу задачу. В случае движущегося тела для определения его положения требуются три числа. Это равносильно утверждению, что наше пространство трехмерно. Так мы описали бы положение точки вблизи земной поверхности, задав ее географические широту и долготу и высоту над уровнем моря. Для определения ее скорости также необходимы три числа. Ими могли бы быть, например, скорости в направлениях восток — запад, север — юг и в вертикальном направлении. С тем же успехом можно было бы задать абсолютную величину скорости и направление движения в пространстве, определяемое в свою очередь двумя числами — углом с вертикалью и направлением вертикальной плоскости, в которой в данный момент происходит движение.

Если мы решаем задачу о движении n тел, то нужно иметь $3n$ чисел для определения их положения в начальный момент и другие $3n$ для определения начального движения. Но может случиться, что некоторые из этих тел жестко связаны друг с другом и не в состоянии поэтому двигаться независимо. Это означает, что между ними действуют какие-то силы. Практически, однако, силы, которые удерживают, например, вместе различные части стального стержня, действуют всегда таким образом, чтобы сохранить его форму, и пока мы не интересуемся внутренними силами в стержне, нам нет нужды применять законы механики к каждой его части отдельно. В таком случае для полного определения положения твердого тела необходимо всего шесть чисел, в чем можно убедиться следующим образом. Зададим прежде всего положение одного из концов стержня, для чего потребуются три числа. Задание положения другого конца потребовало бы трех других чисел, если бы мы не знали длины стержня и, тем самым, не были бы убеждены заранее, что эта точка должна находиться на фиксированном расстоянии от первой. Это позволяет определить ее положение при помощи всего лишь двух независимых чисел (например, направления оси стержня в пространстве, что требует знания двух углов). Закрепив таким образом второй конец, мы еще можем вращать стержень вокруг его оси.

Значит, для окончательного определения требуется еще одно число. Поэтому иногда говорят, что твердое тело, подобно стальному стержню, имеет шесть степеней свободы. Для описания начального движения потребовалось бы еще 6 чисел. Имея уравнения движения и эти 12 начальных условий, можно было бы полностью описать прошлое и будущее стержня.

Механика, рассмотренная нами кратко в этой главе, была первой отраслью естественных наук, которую смогли свести к небольшому числу простых законов. Все остальное, если было необходимо, выводилось уже из них путем математических выкладок. Успешное применение механики в астрономии, баллистике и технике не позволяет сомневаться в правильности ее основных законов. Под влиянием этих успехов ученые при изучении явлений природы стремились объяснять и описывать их при помощи механических моделей. Как мы увидим дальше, это действительно возможно в некоторых случаях (например, в теории теплоты), но далеко не во всех. И теперь мы понимаем, что для полного описания неживой природы мы должны присоединить к основным законам механики новые законы, одни из которых уже достаточно хорошо известны, в то время как другие еще только открываются.

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Закон Кулона

Изучение электрических и магнитных явлений требует гораздо большего напряжения воображения, чем изучение механических. В механике говорилось о движении тел, которое всегда можно увидеть, и о силах, действие которых можно ощутить. Электричество и магнетизм же, как правило, не оказывают прямого действия на наши чувства. Конечно, человек, взявшись пальцами за концы проводов, весьма отчетливо ощущает существование электрического тока, но это вряд ли удобный способ для изучения свойств электрических цепей.

Однако в наше время едва ли найдется читатель, который незнаком по крайней мере с некоторыми явлениями электричества или который не сумел бы включить в сеть электрическую лампочку или сменить батарейку карманного фонаря. Мы будем поэтому считать существование электричества и магнетизма несомненным, а многие, если не все их характеристики известными.

Издавна известно явление электризации тел трением. Если потереть стеклянную или резиновую палочку, она будет притягивать кусочки бумаги или другого легкого вещества с силой, часто достаточной для преодоления их веса. Современным вариантом этого является домашний фокус, когда игрушечный воздушный шар, который сам по себе уже не может держаться в воздухе, трут о шерстяную одежду и на глазах у гостей «приклеивают» к потолку. Как мы теперь знаем, благодаря трению палочка приобретает электрический заряд, и взаимодействие двух таких зарядов друг с другом подобно притя-

жению между двумя массами. Но в отличие от сил тяготения силы между двумя зарядами вызывают как притяжение, так и отталкивание. Сравнивая силы, действующие между различными заряженными телами, можно установить, что существуют заряды двух родов, «положительные» и «отрицательные», и что одноименные заряды отталкивают, а разноименные притягивают друг друга. Величина силы следует, как и в случае тяготения, закону «обратных квадратов» и пропорциональна произведению величин зарядов каждого тела.

Количественно сила отталкивания выражается законом Кулона $\alpha \frac{qQ}{r^2}$, где Q и q — заряды, r — расстояние между ними и α — постоянная. Так как у нас нет иного способа определить величину заряда, кроме как при помощи этого закона, мы имеем право выбрать единицу измерения по собственному произволу и положить $\alpha = 1$. Другими словами, единичный заряд действует на равный ему заряд на расстоянии в 1 см с силой в одну дина (дина есть сила, которая увеличивает скорость тела с массой в 1 г на 1 см/сек за секунду). Закон Кулона дает также правильный знак силы. Действительно, если q и Q оба положительны или оба отрицательны, их произведение тоже положительно, и мы получаем положительную силу. Если же один из них отрицателен, а другой положителен, их произведение отрицательно, и мы получим отрицательное отталкивание, т. е. притяжение.

В явлениях магнетизма подобному закону подчиняется взаимодействие двух магнитных «полюсов». То, что называют магнитными полюсами, можно найти на концах намагниченного стального стержня. Они также бывают двух родов, северные и южные, в зависимости от того, какой из них направлен к северу, если магнит свободно подвешен подобно игле компаса. Как и раньше, одноименные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются. Величина отталкивания дается законом Кулона с магнитными зарядами вместо электрических.

Магнитный заряд, однако, отличается от электрического тем, что невозможно полностью отделить магнитные полюсы друг от друга. Нельзя создать в куске железа северный полюс, не создав в нем одновременно и южного.

Если разломить пополам намагниченную вязальную спицу, то в каждой половине на месте излома возникнет новый полюс, так что они снова будут иметь и северный и южный полюсы такой же величины. Причины этого будут ясны позднее.

До сих пор я рассматривал электрические силы как взаимодействие между двумя зарядами. В практических вопросах интересуются лишь силами, действующими на один заряд, как правило, не желая знать, обязаны ли они другому такому же заряду, находящемуся вблизи, или, может быть, значительно большему, удаленному на большее расстояние, или, наконец, некоторому числу различных зарядов, размещенных где-то по соседству. Поэтому удобно представить силу, действующую на малое заряженное тело, в виде qE , где q — его заряд (положительный или отрицательный), а E — так называемая напряженность электрического поля. E есть направленная величина, так как должна указывать не только величину, но и направление силы.

Когда в пространстве вокруг рассматриваемого тела находится только один заряд, из закона Кулона следует:

$$E = \frac{Q}{r^2}, \text{ где } Q \text{ — величина этого заряда, а } r \text{ — расстояние.}$$

Электрическое поле, конечно, направлено вдоль линии, соединяющей заряды. Если же мы, напротив, имеем много зарядов, E будет равна сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из них. E , конечно, зависит от положения исследуемого тела, на которое она действует. Мы можем определить напряженность поля E , создаваемого некоторой системой зарядов, в любой точке пространства независимо от того, находится ли в действительности в этой точке заряженное тело. Таким образом, E есть сила, которая действовала бы на тело, несущее единичный заряд, если бы оно находилось в рассматриваемой точке.

Все сказанное выше относится и к напряженности магнитного поля, обычно обозначаемой буквой H . Магнитная сила, действующая на полюс с зарядом p , запишется тогда как pH .

Пока мы имеем дело только с электростатикой и магнитостатикой, т. е. с полями покоящихся зарядов и полю-

сов, силы, действующие на заряженные тела, будут консервативными, в том смысле, в каком мы употребляли это слово в предыдущей главе. Это означает, что, когда мы перемещаем заряженное тело из некоторой точки A в другую точку B , силы поля совершат определенную работу, и, если не действуют никакие другие силы, кинетическая энергия тела изменится как раз на эту величину. Когда тело возвратится в точку A , безразлично, по старому пути или нет, работа, произведенная над ним, будет равна и противоположна по знаку работе, произведенной на пути из A в B , так что полная работа на пути туда и обратно равна нулю. Или, мы можем сказать: циркуляция сил равна нулю, в том же смысле этого слова, что и в главе 1.

В справедливости нашего утверждения можно убедиться следующим образом. Если сила создана одиночным зарядом, она подчиняется закону обратных квадратов, подобному ньютоновскому закону тяготения, и поэтому, как мы видели в предыдущей главе, консервативна. Если же имеется более чем один заряд, поле силы, действующей на тело, есть сумма полей всех зарядов. И так как на замкнутом пути ни одно из них не совершает работы, суммарное поле должно быть также консервативно.

Отсюда следует важное заключение о существовании в статическом электрическом поле меняющегося от точки к точке потенциала, который мы обозначим буквой V . Этот потенциал определяется таким образом, что работа, совершаемая электрической силой над телом с зарядом q при перемещении из точки A в точку B , равна $q(V^A - V^B)$. Выражение в скобках представляет разность потенциалов между A и B .

Так как работа есть сила, умноженная на расстояние, легко видеть, что, зная потенциал, можно найти напряженность электрического поля как быстроту изменения потенциала с расстоянием, т. е. как разность потенциалов между двумя близкими точками, деленную на расстояние между ними.

В случае палочки из стекла или резины, которую мы взяли за исходную точку нашего изложения, было обнаружено, что заряд, помещенный на какую-нибудь часть ее поверхности, остается всегда на одном и том же месте.

Имеются, однако, другие вещества, известные как проводники электричества. Сюда относятся все металлы и, в меньшей степени, различные другие твердые тела, растворы солей в воде и так далее. Электрические заряды могут передвигаться через проводники. Если два равных и противоположных заряда помещены на разных концах такого проводника, они начнут двигаться из-за сил притяжения навстречу друг другу и в конце концов встретятся. После этого тело окажется незаряженным, ибо

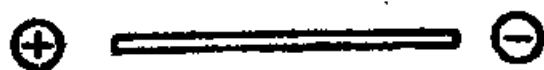


Рис. 7. Проволока между двумя зарядами.

действие противоположных зарядов скомпенсируется. В действительности, как мы знаем, всякий проводник содержит заряды обоих знаков и по крайней мере неко-

торые из них в состоянии свободно двигаться. (В металлах подвижны, например, отрицательные заряды.) Пусть проводник помещен в электрическое поле, как показано на рис. 7, где кусок провода расположен между положительным и отрицательным зарядами. Тогда электрическое поле этих зарядов притянет положительные заряды в проводе направо, а отрицательные — налево. Иными словами, правый конец провода зарядится положительно, а левый отрицательно, а это в свою очередь изменит окружающее поле. Движение зарядов в проводе будет продолжаться, пока не исчезнет поле вдоль проводника, которое могло бы привести к передвижению зарядов внутри него. Конечное состояние достигается, когда электрический потенциал одинаков во всех точках провода. Если бы между какими-то двумя точками появилась разность потенциалов, то тотчас же между ними возникло бы электрическое поле и заставило снова двигаться заряды. Следовательно, в статическом поле, когда все заряды покоятся, потенциал вдоль проводника должен быть постоянным.

По этой же причине заряды, помещенные на проводник, будут отталкиваться и удаляться друг от друга настолько возможно, пока электрический потенциал проводника не станет всюду одинаковым. Это приведет к тому, что заряды распределятся в конце концов исключительно на поверхности, так как внутри проводника заряд был бы

окружен электрическим полем, которое имело бы меняющийся потенциал. Распределение заряда на поверхности зависит от ее формы (в случае сферического проводника, например, заряд распределяется равномерно). Этим же объясняется знаменитый эксперимент с «клеткой Фарадея», доказывающий, что в пространстве, ограниченном металлическими стенками произвольной формы, отсутствуют какие бы то ни было электрические силы; находящиеся снаружи заряженные тела и внешние электрические поля не действуют на заряды внутри клетки.

Электрический потенциал можно непосредственно измерить при помощи прибора, известного под названием электроскопа. Простейший электроскоп состоит из двух тонких листочков фольги L , укрепленных на металлическом стержне (рис. 8). Они обычно заключены в стеклянный сосуд, чтобы предохранить их от воздействия течений в окружающем воздухе. Предположим, что пластина электроскопа



Рис. 8.
Электроскоп.

P соединена с некоторым телом, потенциал которого больше (более положителен), чем потенциал электроскопа. Тогда заряд начнет переходить с него на электроскоп, пока их потенциалы не сравняются. При этом листочки окажутся заряженными положительно и поэтому будут отталкивать друг друга. Они отклонятся от вертикального положения и разойдутся на некоторый угол, как показано на рисунке. Этот угол зависит от отношения между силой отталкивания и весом листочков, который стремится удержать их в вертикальном положении. По величине угла можно определить значение потенциала.

Силовые линии

Теперь мы полностью установили законы электростатики в применении к любой системе проводников произвольной формы, с любыми зарядами на них; однако решить такую статическую задачу, т. е. определить, как нужно распределить заряды по поверхности проводников, чтобы потенциал каждого был постоянным, далеко не всегда просто. Большую помощь в решении этой про-

блемы, а также при графическом изображении электрического поля, оказывает понятие силовой линии.

Я отмечал ранее, что напряженность электрического поля определена в каждой точке пространства и характеризуется величиной и направлением. Мы могли бы поэтому изобразить электрическое поле, нарисовав в ряде точек маленькие стрелки так, чтобы направление каждой показывало направление напряженности в этой точке. Пример такого построения дан на рис. 9, а для случая

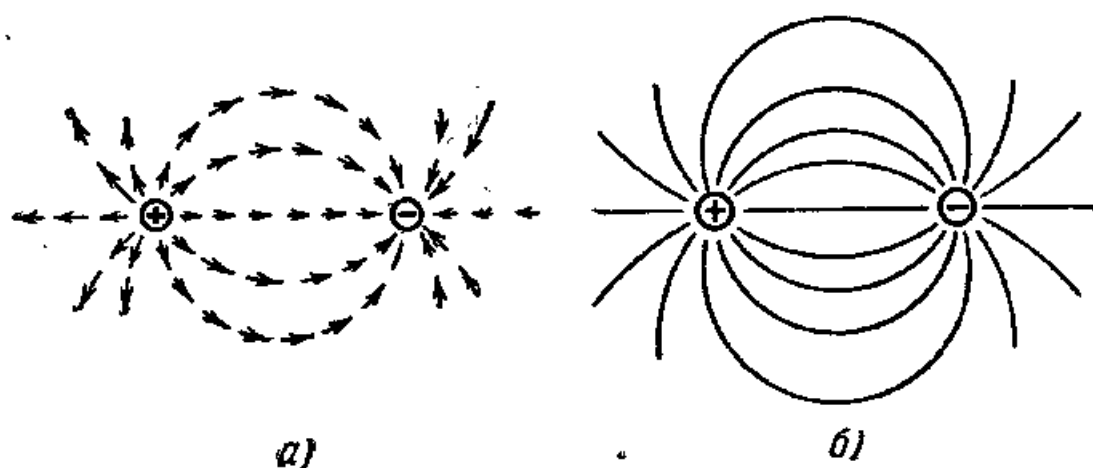


Рис. 9. а — стрелки показывают направление поля;
б — силовые линии.

двух равных и противоположных зарядов. Вблизи положительного заряда стрелки направлены от него, так как он отталкивал бы положительно заряженное пробное тело, вблизи же отрицательного заряда обращены к нему. В других местах поле можно получить, сложив поля отдельных зарядов, подчиняющиеся закону Кулона. Чтобы нарисовать теперь силовую линию, надо соединить ряд таких стрелок сплошной кривой, имеющей в каждой точке направление стрелки, т. е. направление электрического поля. Получающаяся при этом картина показана на рис. 9, б. Читатель, вероятно, видел подобные картины, образованные железными опилками, рассыпанными вблизи северного и южного полюсов постоянного магнита. Характерно, что хотя опилки скорее напоминают стрелки на рис. 9, а, глаз стремится соединить их в сплошные линии рис. 9, б.

Казалось бы, что силовые линии могут изобразить только направление поля, но никак не его величину, од-

нако такие картинки определяют также и напряженность. Поле сильнее в местах, где силовые линии сгущаются, и, напротив, слабее там, где они расположены более редко. Другими словами, плотность силовых линий, т. е. число их, пересекающее малую площадку данных размеров, проведенную перпендикулярно к направлению поля, пропорциональна напряженности поля.

Это утверждение, очевидно, справедливо для поля одиночного точечного заряда. Рассмотрим рис. 10. В точке O находится заряд Q ; силовые линии есть прямые, исходящие из Q , так как в любой точке пространства силы поля направлены от Q . Проследим за теми силовыми линиями, которые проходят через малый круг A_1 на расстоянии r_1 от Q . На расстоянии r_2 они займут уже круг большей площади A_2 . Из рисунка видно, что диаметры кругов возрастают в отношении r_2 к r_1 ; если r_2 вдвое больше r_1 , то диаметр круга A_2 вдвое больше диаметра A_1 . Площади кругов меняются как квадраты их диаметров и, следовательно, площадь A_2 в четыре раза больше, чем площадь A_1 . Значит, площадь, занимаемая выбранным пучком силовых линий, на расстоянии r_2 увеличилась в четыре раза по сравнению с r_1 , а число силовых линий, проходящих на единицу площади, в четыре раза уменьшилось. Вообще число силовых линий меняется обратно пропорционально квадрату расстояния от Q , точно так же как, по закону Кулона, меняется напряженность электрического поля.

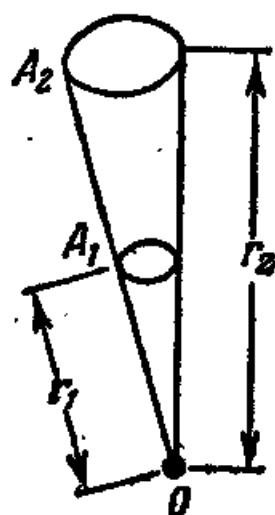


Рис. 10. Силовые линии и закон Кулона.

Справедливость нашего утверждения для большего числа зарядов нельзя проверить столь же простым способом, и я надеюсь, что читатель согласится с ним, как с достаточно правдоподобным. Его обычно называют теоремой Гаусса.

Силовые линии, нарисованные описанным выше способом, всегда начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, или, в случае, когда система зарядов не заключена в какой-нибудь металлический ящик, некоторые из них могут приходить из беско-

нечности (как в случае одиночного отрицательного заряда) или уходить в бесконечность (в случае одиночного положительного).

Полное число силовых линий, начинающихся на положительном заряде величиной Q , равно, как легко видеть, $4\pi Q$. Действительно, если мы построим сферу радиусом r вокруг заряда, площадь ее поверхности есть $4\pi r^2$. Число силовых линий, проходящих через единицу площади, должно равняться напряженности электрического поля на этом расстоянии от заряда, $\frac{Q}{r^2}$. Поэтому для полного их числа и получается $4\pi Q$.

Таким образом, мы видим, что статическое электрическое поле имеет две важные характеристики. Во-первых, его величина и направление могут быть описаны с помощью силовых линий. Поля этого типа называются свободными («свободными от расхожимости»). Строго говоря, в свободном поле линии нигде не начинаются и не кончаются. Мы должны поэтому сделать дополнительное утверждение, что на положительном (отрицательном) заряде величиной Q начинается (оканчивается) $4\pi Q$ силовых линий. Во-вторых, силы электрического поля консервативны. Такие поля иногда называют безвихревыми. Безвихревые поля не имеют циркуляции, они не совершают работы над телом, когда оно описывает замкнутый путь, и, следовательно, не стремятся привести его во вращательное движение.

Остановимся на одном очень важном пункте. Оказывается, утверждение, что поле является свободным и безвихревым, может полностью заменить закон Кулона. Если мы знаем, где начинаются и где кончаются силовые линии, и если известно, что они изображают безвихревое поле, этого уже достаточно для однозначного определения их формы.

На рис. 11 дан простой пример того, как используется это свойство на практике для получения распределения зарядов и картины поля. Здесь изображены две параллельные металлические пластины, находящиеся на расстоянии d друг от друга и поддерживаемые при потенциалах V_1 и V_2 . Такое устройство известно под названием конденсатора. Рассмотрим поведение силовых линий в

этом случае. Пусть верхняя пластина заряжена положительно, а нижняя отрицательно, и никаких других зарядов больше нет. Тогда силовые линии начинаются на верхней пластине и оканчиваются на нижней и, если ширина пластин велика по сравнению с расстоянием d , как показано на рисунке, почти все линии находятся в пространстве между ними. Далее, они должны входить в пластину или выходить из нее под прямым углом, ибо в противном случае имела бы составляющая напряженности поля вдоль пластин и их потенциал не был бы постоянным. Таким образом, напряженность поля обязательно перпендикулярна к поверхности пластин.

Предположим теперь, что, выйдя из пластины, силовые линии стремились бы изогнуться, как показано на рис. 11, а, и рассмотрим две близкие линии, начинающиеся в точках A и D . Тогда, если мы передвигаем пробный заряд вдоль одной из них, силы поля совершают над ним работу. При переходе к другой линии, от B к C , никакой работы не совершается, так как заряд движется под прямым углом к направлению силовой линии и, следовательно, перпендикулярно к электрической силе. Составляющая поля в направлении движения в этом случае равна нулю. Наконец, когда мы переводим наше пробное тело из C в D вдоль второй силовой линии, оно движется против электрической силы и затратит поэтому некоторую работу. Учтем, что расстояние между силовыми линиями, как мы их изобразили, остается приблизительно постоянным, а следовательно, вдоль них постоянна и напряженность поля. Но на обратном пути пробное тело прошло меньшее расстояние и потеря энергии на нем меньше, чем выигрыш в энергии на пути из A в B . Заметим еще, что на пути AD

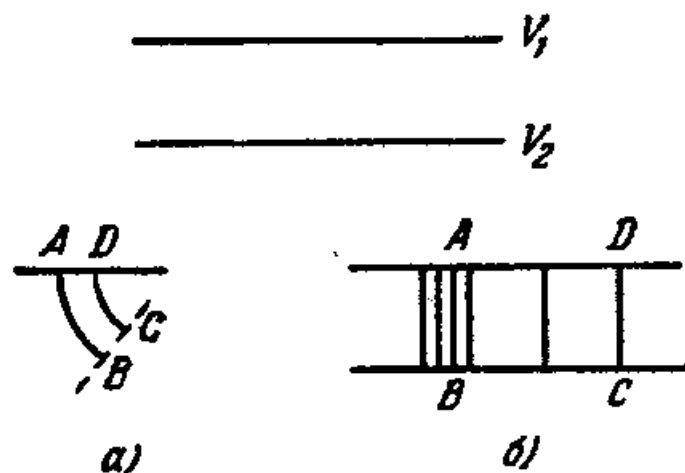


Рис. 11. Плоскопараллельный конденсатор.

а — силовые линии должны быть прямыми;
б — силовые линии должны быть распределены равномерно.

не совершается никакой работы из-за постоянства потенциала пластины. Таким образом, поле силовых линий, изображенных на рис. 11, а, обязательно обладает циркуляцией.

Подобными же рассуждениями можно исключить и другие возможные формы силовых линий, и мы приходим к выводу, что всюду, кроме областей вблизи концов пластин, силовые линии должны быть прямыми. Их плотность также постоянна, ибо в противном случае была бы отлична от нуля циркуляция вдоль контура $ABCD$ на рис. 11, б. Следовательно, силовые линии прямолинейны и равномерно распределены в пространстве. Напряженность поля всюду вертикальна и постоянна по величине. Тогда работа, совершаемая при переходе с 1-й пластины на 2-ю, есть Ed , где E — напряженность, и это должно равняться $V_2 - V_1$, откуда

$$E = \frac{V_2 - V_1}{d}.$$

Так как число линий, выходящих с единицы поверхности пластины, есть E , то плотность заряда на пластине (заряд, находящийся на единице ее поверхности) равна $\frac{E}{4\pi}$, или $\frac{V_2 - V_1}{4\pi d}$.

Правильный результат для плотности заряда можно было получить, и не используя концепцию силовых линий и тот факт, что поле является свободным и безвихревым. Однако это потребовало бы применения значительно более мощных математических средств.

Законы поля или действие на расстоянии

Я разобрал столь детально пример с конденсатором для того, чтобы показать, как эти характеристики поля могут быть удобно использованы для его нахождения. Но дело здесь не только в удобстве. Мы заменили закон Кулона утверждением, что электрическое поле является свободным и безвихревым, а его силовые линии возникают и уничтожаются на зарядах. Тем самым мы заменили действие на расстоянии законом, описывающим изменение

поля от точки к точке. В формулировке основных законов физики всегда имелась тенденция избегать понятий, допускающих существование взаимодействия между телами на расстоянии. Рассмотрим в качестве простого примера дверной звонок. Потянем за ручку на двери и заставим звонить колокольчик в другом конце дома. Мы вряд ли удовлетворимся объяснением, что ручка непосредственно действует на колокольчик, поскольку знаем, что существует проволока, их соединяющая, а ручка только натягивает привязанную к ней проволоку. Каждый участок проволоки после рывка несколько растягивается и тянет соседний участок, и таким образом рывок передается к колокольчику на другом конце.

Эти явления описываются законами механики и теории упругости; последняя утверждает, что каждый участок проволоки будет противостоять любой попытке его растянуть. Поэтому и законы механики и законы теории упругости выступают здесь как локальные законы, рассматривающие поведение проволоки во всех ее точках.

Различие между происходящим здесь и фактическим действием на расстоянии станет особенно важным, когда мы рассмотрим проволоку очень большой длины, например проволоку, управляющую семафорами на железной дороге. Слабое растяжение проволоки под действием приложенной к ней силы некоторое время ничем не проявит себя и в результате этого стрелка семафора на другом конце не начнет двигаться сразу же после того, как диспетчер приложит силу. Благодаря своей упругости она передает действие только с конечной скоростью.

С открытием электричества создалась новая ситуация: казалось бы, как следует из закона Кулона, любой заряд может мгновенно после своего появления действовать на другие заряды, где бы они ни находились. Поэтому естественно было спросить, не существует ли какой-нибудь «посредник», передающий это действие. Прежде всего попытались развить идею механической среды, которая могла бы участвовать в такой передаче, и назвали ее эфиром.

Придуманный для этих целей эфир должен иметь очень специфические качества. Именно, он обязан заполнять все пространство, поскольку электрические силы могут

•

передаваться из любой его точки в любую другую. Равным образом, он должен свободно проникать в вещество, так как действие электричества передается через все твердые тела, не являющиеся проводниками. Если бы он действительно был упругой средой, которая передает электрические возмущения так же, как обычные твердые тела передают растяжения или сдвиги, ему пришлось бы приписать исключительную плотность и твердость, чтобы объяснить распространение действий с очень большой скоростью. Но в то же время твердые тела должны были бы свободно проходить сквозь него без заметного сопротивления или трения.

Такой эфир совершенно не похож на известные нам упругие вещества, и попытка объяснить с его помощью электрические силы уже сразу была мало привлекательной. Эта идея становится совершенным абсурдом, если мы вспомним, что законы упругости не являются фундаментальными законами природы. Как мы увидим в следующих главах, поведение упругих тел объясняется поведением атомов, из которых они состоят, и взаимодействием между ними. Мы увидим также, что межуатомные силы являются, в конечном счете, силами электрическими, и поэтому, если мы попытаемся объяснить явление электричества в терминах теории упругости, наши рассуждения будут вращаться в порочном кругу.

Но хотя физики были вынуждены отказаться от идеи механического эфира, они могли полностью сохранить идею поля. Физический закон описывает поведение электрического поля и связывает поле в одной точке пространства с полем в соседней. Мы не можем сказать о том, что такое электрическое поле, сколько-нибудь больше, чем раньше могли сказать о понятиях массы или силы. И те и другие представляют собой нечто выведенное из опыта и совершенно необходимы для описания законов природы. Между ними имеется лишь то различие, что понятия массы и силы возникли из опыта, доступного непосредственно нашим чувствам, в то время как понятие поля родилось из экспериментов ученого, исследовавшего законы природы. И не удивительно, если одни кажутся с первого взгляда более естественными и знакомыми, чем другие.

До сих пор мы занимались только электро- и магнито-статикой, т. е. покоящимися зарядами и магнитами. На этой стадии различие между уравнениями поля и понятием действия на расстоянии есть исключительно дело вкуса. Мы нашли законы электрического поля, которые полностью эквивалентны закону Кулона, и можем с равным правом применять то или другое. В дальнейшем, однако, мы увидим, что, как и в примере с управлением семафорами при помощи проволоки, в случае электричества действие также передается с конечной, хотя и очень большой скоростью, и для того, чтобы учесть это, мы вынуждены пользоваться понятием поля.

Электромагнетизм

Сделаем первый шаг за рамки электростатики и рассмотрим электрические токи. Как мы уже видели, электрический заряд может двигаться вдоль проводника, но до сих пор нас интересовало только конечное состояние, когда течение заряда прекратилось. Движение электричества по проводнику и представляет собой электрический ток. Его сила измеряется количеством заряда, прошедшего в секунду через проводник. Легко создать токи, соединив при помощи металлической проволоки два проводника, имевших разные потенциалы, например две пластины конденсатора на рис. 11. Но так как запас зарядов в этом случае ограничен, их движение довольно скоро прекратится. Постоянный ток можно получить из электролитической ячейки, или батареи, устройство которой мы здесь обсуждать не будем. Достаточно заметить только, что в результате химической реакции на ее зажимах образуется определенная разность потенциалов.

Таким и многими другими способами можно поддерживать постоянное течение зарядов в проводнике значительное время. Оказывается, для этого нужно только приложить постоянную разность потенциалов между концами провода. Тогда внутри проводника существует некоторое электрическое поле, силы которого и действуют на заряды внутри него. В этом поле заряды непрерывно ускорялись бы и их скорость возрастала, если бы их

движению не препятствовало трение или сопротивление. Все нормальные металлы обладают конечным сопротивлением, мешающим движению зарядов и поэтому являющимся неконсервативной силой. При протекании электричества через проводник с конечным сопротивлением его энергия переходит в теплоту и этот факт используется в электронагревателях и лампах накаливания. В большинстве других электрических приборов эффект нагревания вреден и его стремятся уменьшить, подобно трению в машинах.

Уже в первых экспериментах с токами в проводниках мы обнаруживаем новое явление, именно, что электрический ток создает магнитное поле. Наблюдения (например, с помощью стрелки компаса) показывают, что силовые линии магнитного поля длинного прямого провода располагаются, как показано на рис. 12. Провод здесь перпендикулярен к плоскости рисунка, черный круг в центре изображает его сечение. Напряженность магнитного поля падает обратно пропорционально расстоянию r . Она пропорциональна силе тока, и мы можем записать ее в виде: $H = \frac{2i}{cr}$, где i — сила тока (т. е. количество заряда, протекающего через провод в единицу времени) и c — новая константа, которая определяется из эксперимента, c оказывается равным 30 000 000 000 см в секунду. Когда имеют дело с такими большими числами, неразумно выписывать все нули подряд; в этом случае для сокращения пишут: $c = 3 \cdot 10^{10}$. Действительно, квадрат 10 есть 100, т. е. единица с двумя нулями, 10 в кубе есть единица с тремя нулями, подобным же образом десять в десятой степени есть единица с десятью нулями.

Магнитное поле тока, очевидно, не является уже безвихревым. Когда мы проносим магнитный полюс по одной из concentрических окружностей, мы остаемся все время на одной силовой линии, направление силы магнитного поля совпадает с направлением движения и, следовательно, сила будет производить работу на всем пути. Так как работа равна силе, умноженной на путь, легко видеть, что циркуляция вдоль окружности радиуса r равна $\frac{4\pi i}{c}$ (для этого надо учесть, что длина окружности равна $2\pi r$).

Результат не зависит от того, по какой из окружностей пронести полюс, и, как можно показать, останется тем же самым для произвольного замкнутого пути, охватывающего проводник. Циркуляция напряженности магнитного поля вокруг провода с током равна $\frac{4\pi i}{c}$.

Можно также показать, что циркуляция по любому контуру, не охватывающему проводник (например по контуру, изображенному на рис. 12 пунктирной линией), равна нулю. В этом случае полюс проходит обязательно часть пути по полю, а другую часть против поля. Если он движется в направлении, показанном стрелкой, то на большей части пути направление движения совпадает с полем, но зато на других участках само поле имеет большую величину. Таким образом, в пространстве вне проводника магнитное поле, как и раньше, остается свободным и безвихревым. Вихревым оно становится только внутри провода, и в этой области второй из наших законов должен измениться.

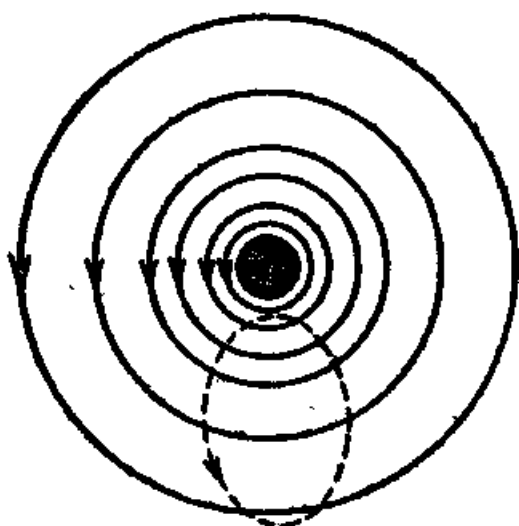


Рис. 12. Магнитное поле вокруг тока.

Мы следующим образом суммируем сведения об электрическом и магнитном полях: всюду, где нет зарядов и электрических токов, электрические и магнитные поля являются свободными и безвихревыми и могут быть описаны с помощью силовых линий, которые нигде не начинаются и не кончаются и циркуляция вдоль которых равна нулю. В областях, где имеются заряды, электрическое поле перестает быть свободным; разность между числом входящих туда и выходящих оттуда силовых линий дает величину полного заряда в этой области (т. е. разность между положительным и отрицательным зарядом), умноженную на 4π . В присутствии электрических токов магнитное поле делается вихревым. Циркуляция его напряженности по замкнутому контуру равна полному току, проходящему через него, умноженному на $\frac{4\pi}{c}$.

В такой форме законы пригодны только для полей, не меняющихся со временем. Этому соответствует случай, когда не меняется распределение зарядов в пространстве, а все токи постоянны.

Отметим, что магнитное поле всегда остается свободным; иначе говоря, его силовые линии нигде не начинаются и не кончаются. Они или замкнуты или приходят из бесконечности и снова возвращаются в бесконечность. Это стало бы невозможным, если бы существовали реальные магнитные полюсы, поскольку силовые линии тогда возникали бы или уничтожались на них. Однако еще никто никогда не видел свободных магнитных полюсов, и, как мы увидим дальше, все свойства магнитов, например, стали, могут быть объяснены наличием мельчайших круговых токов внутри нее. Рассмотрим силовые линии поля магнитного стержня. Они выходят из северного полюса, возвращаются к южному и замыкаются внутри магнита, проходя уже в обратном направлении от южного полюса к северному. На рис. 13, а показаны силовые линии вне такого магнита. На рис. 13, б изображено поле катушки, обтекаемой током. Силовые линии вне ее точно такие, как и у магнитного стержня. Внутри же, в отличие от него, они замыкаются, не меняя направления. Не следует, однако, представлять себе магнит в виде такой катушки. Он скорее состоит из большого числа мельчайших круговых токов, распределенных по всему его объему.

Магнитное действие тока имеет огромное практическое значение. Действительно, электрический ток создает вокруг себя магнитное поле, и благодаря ему возникают силы, действующие на магниты или вещества, подобные железу, которые намагничиваются в присутствии поля. Эти силы используются в большом числе приборов и машин и, в частности, дают возможность удобно измерять электрические токи.

Такой прибор известен под названием гальванометра. В простейшем варианте гальванометра ток пропускается через катушку, чтобы увеличить его магнитное действие, а магнитная стрелка укреплена подобно стрелке компаса внутри катушки или вблизи нее. Отклонение стрелки тогда показывает напряженность магнитного поля, а тем самым и силу тока.

Магнитный способ измерения тока настолько проще прямого нахождения величины заряда, переносимого током в единицу времени, что магнитным эффектом часто пользуются для определения единицы силы тока. Отсюда возникли так называемые электромагнитные единицы для измерения тока. Так как в формулу для магнитного

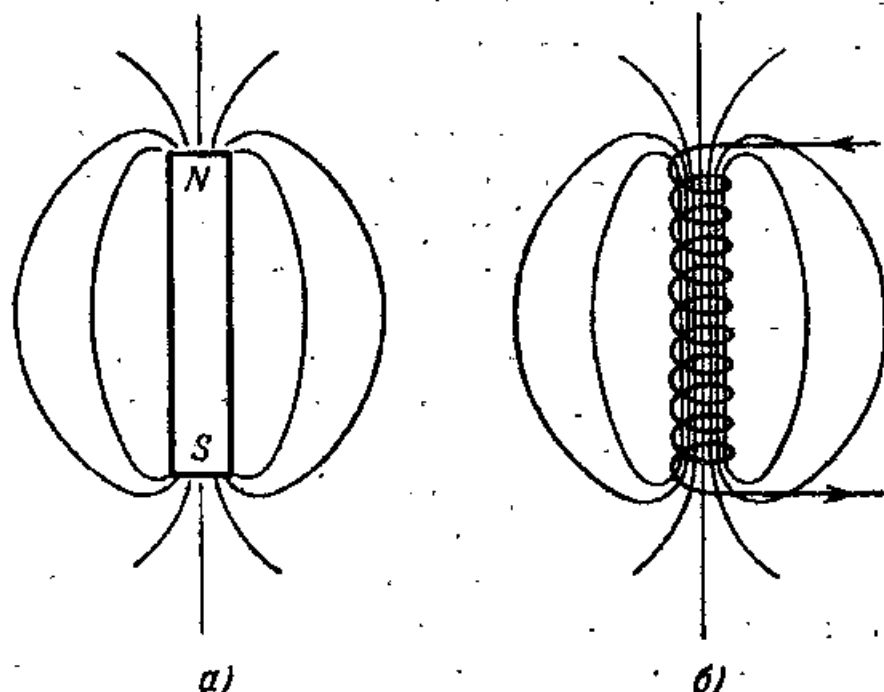


Рис. 13. *а* — постоянный магнит; *б* — магнитное поле катушки.

поля ток входит в комбинации $\frac{I}{c}$, то отношение $\frac{I}{c}$ часто выбирают в качестве величины, показывающей силу тока. Впрочем, в этой книге мы не будем пользоваться электромагнитными единицами, и я упомянул о них, имея в виду читателя, уже знакомого с формулами теории электричества, написанными в электромагнитных единицах, которого могло бы смутить кажущееся их отличие от наших результатов.

Из закона действия и противодействия следует, что если ток действует на магнит, то и магнит в свою очередь должен действовать на ток. Другими словами, на проводник, помещенный в магнитное поле, будет действовать некоторая сила. Аргументов, основанных на третьем законе Ньютона, вполне достаточно, чтобы определить ее величину и направление. Но мы не станем приводить

здесь соответствующие рассуждения, а сразу дадим результат: сила, действующая на проводник длиной l , обтекаемый током i и помещенный в магнитное поле с напряженностью H , направлена под прямым углом к направлениям тока и магнитного поля и равна $F = \frac{ilH_{\perp}}{c}$, где

H_{\perp} — составляющая поля, перпендикулярная к току.

Сила, действующая на проводник в магнитном поле, используется в электрическом моторе. Рассмотрим, например, устройство, схематически изображенное на рис. 14. Несколько витков проволоки, обтекаемой током, намотано на прямоугольную рамку, которая может свободно

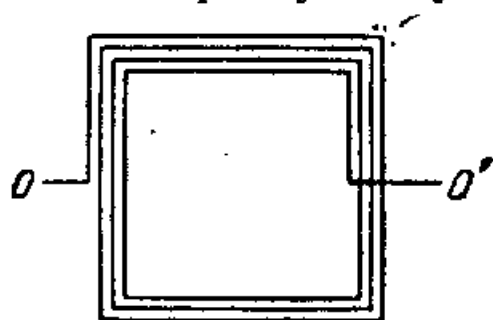


Рис. 14. Принцип устройства электромотора.

вращаться вокруг оси OO' . Рамка помещена в вертикальное однородное магнитное поле. Тогда, если ток течет от O к O' , на верхнем краю рамки сила будет перпендикулярна к плоскости рисунка и направлена от нас. В нижней части рамки ток течет в противоположном направлении и поэтому сила также изменит знак. В результате

рамка начнет вращаться вокруг оси OO' . Так будет продолжаться до тех пор, пока она не повернется на прямой угол. В этом положении силы больше не способствуют ее вращению. Если благодаря своей инерции рамка повернется дальше, то при этом тот ее край, в котором ток течет слева направо, окажется ниже другого, и силы уже будут стремиться повернуть ее в противоположном направлении. Чтобы избежать этого, мотор снабжается устройством, называемым коллектором. Он представляет собой систему скользящих контактов, посредством которых направление тока меняется на обратное, как только рамка проходит через горизонтальное положение. Поэтому когда рамка опять станет вертикально, ток в ее верхнем крае снова течет слева направо, и силы продолжают толкать ее в том же направлении. Магнитное поле, необходимое для работы мотора, можно создать либо постоянным магнитом, либо при помощи неподвижных катушек, через которые пропускается ток.

На практике мотор состоит из большого числа вращающихся витков, намотанных для усиления действия поля на железный сердечник.

Индукция. Генератор и трансформатор

Вернемся от этих практических примеров к обсуждению основных законов. Мы встречаемся с совершенно новыми явлениями, когда рассматриваем поля или токи, меняющиеся со временем либо потому, что изменяются источники тока, либо потому, что двигаются магниты или проводники, создающие поле. Наиболее важные относящиеся сюда открытия были сделаны Фарадеем. Если поместить замкнутый проводочный контур в меняющееся со временем магнитное поле или, что все равно, перемещать контур в постоянном поле, то в нем возникнет ток. Мы видели ранее, что для того чтобы возбудить ток в проводе, или, иначе, заставить двигаться находящиеся в проводе заряды, нужно приложить вдоль него определенное электрическое поле. Как показывает эксперимент, в случае кругового проводочного контура напряженность этого поля равна величине $\frac{1}{2\pi r c}$, умноженной на быстроту изменения магнитного потока, т. е. на быстроту изменения числа магнитных силовых линий, охватываемых контуром. Результат получается одинаковым независимо от того, каким способом меняют магнитный поток. Можно, оставляя контур неподвижным, менять магнитное поле, перемещая находящиеся поблизости магниты или размыкая ток в катушке, или, напротив, передвигать контур в постоянном поле.

На последнем способе основан принцип действия электрического генератора, который устроен точно так же, как и электрический мотор (см. рис. 14). Если заставить вращаться прямоугольную катушку, приложив силу извне, то число пересекающих ее силовых линий будет все время изменяться. Оно будет наибольшим, когда рамка горизонтальна, и равно нулю в вертикальном положении. Когда она снова станет горизонтально, но повернувшись другой стороной, магнитные силовые линии

пересекут ее в противоположном направлении. Поэтому полное число силовых линий, или поток, меняется от наибольшего положительного значения в первом горизонтальном положении до равного по величине и отрицательного при другом. Быстрота изменения потока максимальна в вертикальном положении, и скользящий контакт коллектора связывает катушку с внешней цепью как раз в этот момент. Таким образом, вращающаяся катушка будет посылать во внешнюю цепь прерывистый ток постоянного направления. Применяя большое число катушек, расположенных под разными углами, можно получить ток почти постоянной силы.

Для нахождения простой формулировки закона более интересен случай, когда виток проволоки покоится в переменном магнитном поле. Здесь мы видим, что электрическое поле, заставляющее ток течь по витку, отличается от тех полей, с которыми мы встречались раньше. Эти знакомые нам поля всегда были безвихревыми, т. е. не совершали работы над пробным зарядом, описывающим замкнутый путь. Теперь же поле направлено вдоль витка всегда в одну сторону и совершаемая над пробным зарядом работа равна напряженности, умноженной на путь, проходимый им вдоль витка, т. е. на длину окружности $2\pi r$. А это есть не что иное, как быстрота изменения магнитного потока со временем, умноженная на $\frac{1}{c}$.

Последнее заключение оказывается не зависящим от формы витка. Мы можем поэтому учесть явление электромагнитной индукции, исправив наши законы электрического поля следующим образом: в отсутствие переменных магнитных полей электрическое поле является безвихревым; в противном случае его циркуляция по замкнутому контуру равна $\frac{1}{c}$, умноженной на быстроту изменения магнитного потока через контур.

Электрическое действие переменных магнитных полей также используется во многих важных практических приложениях. Одним из них является трансформатор, принципиальная схема которого дана на рис. 15. Две катушки *A* и *B* размещены близко друг к другу, с тем чтобы магнитные силовые линии, созданные в *A*, или по крайней

мере некоторые из них, проходили сквозь катушку B . Через зажимы a_1 и a_2 к катушке A подводится ток. Направление этого тока быстро меняется, совершая n полных колебаний в секунду (частота n промышленного тока составляет обычно 50 или 60 колебаний в секунду). Когда ток меняет свое направление, изменяется и направление создаваемого им поля, а следовательно, и магнитный поток через катушку B . Поэтому, как мы видели, вдоль нее возникнет электрическое поле, также меняющее свое направление n раз в секунду. Если к зажимам b_1 и b_2 подключить какую-нибудь цепь (в общем случае она может содержать сопротивление), по ней потечет ток.

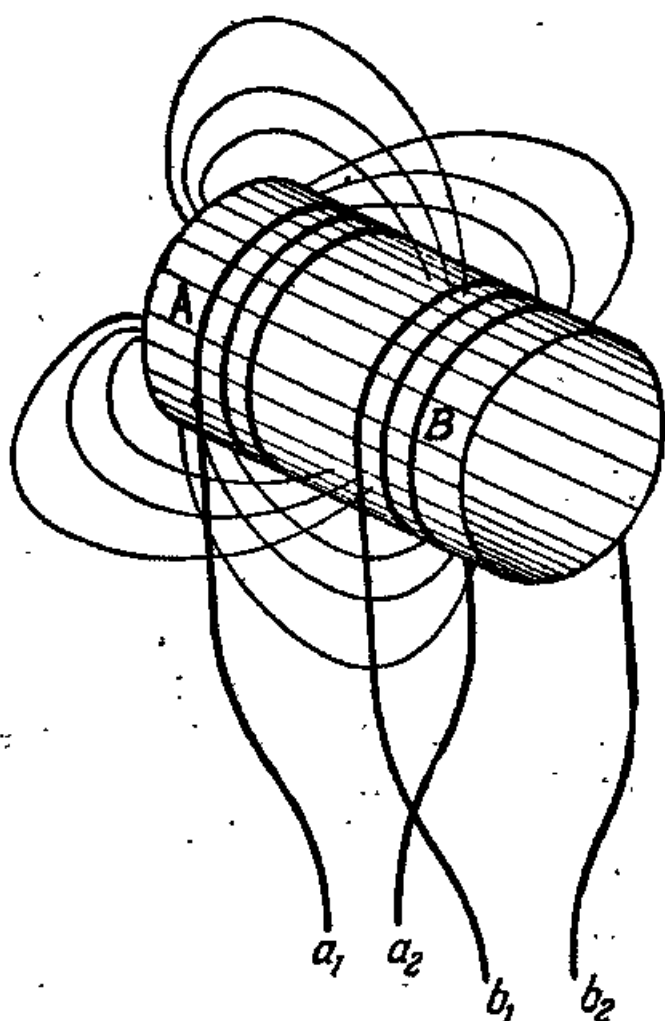


Рис. 15. Принцип устройства трансформатора.

Ток во внешней цепи ничем не будет отличаться от тока, который создала бы приложенная к зажимам b_1 и b_2 переменная разность потенциалов; ее величина опять-таки равна электрическому полю в катушке, умноженному на полную длину провода. Поэтому часто говорят о создаваемой трансформатором разности потенциалов, или напряжении. Использовать этот термин следует, однако, с осторожностью, так как мы уже видели, что понятие потенциала применимо только к безвихревому электрическому полю. И действительно, обычные элементарные введения в теорию электричества, начинающие изложение с понятия потенциала, могут привести читателя в смущение, когда он спросит у себя, как меняется потенциал вдоль цепи, содержащей обмотку трансформатора или электрического генератора. Чтобы обойти эту трудность, ввели термин

«электродвижущая сила» (э. д. с.) для произведения напряженности электрического поля на длину провода, или, что то же самое, для эквивалентной разности потенциалов, которую можно было бы приложить к зажимам b_1 и b_2 , чтобы получить во внешней цепи такой же ток. Если заданы форма первичной обмотки A и ток в ней, а следовательно, ее магнитное поле и быстрота, с которой оно меняется, электродвижущая сила во вторичной обмотке B пропорциональна числу ее витков. Наматывая очень большое их число, мы получим очень большую электро-

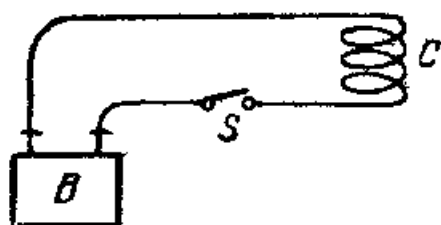


Рис. 16. Самоиндукция.

движущую силу, но, с другой стороны, сможем снять с нее только крайне слабый ток. Действительно, слишком сильный ток, протекая по виткам, создал бы сильное магнитное поле, которое воздействовало бы обратно на первичную обмотку A . Поэтому такой трансформатор используется для преобразования данного переменного тока в другой значительно более слабый ток, но имеющий зато очень большое эквивалентное напряжение и способный поэтому протекать по цепям с высоким сопротивлением. Напротив, взяв вторичную обмотку B с числом витков, меньшим чем в первичной, можно использовать трансформатор, чтобы получить токи значительно большей силы, чем максимально возможные в первичной цепи.

То же самое явление индукции часто становится важным в процессах, происходящих в одной катушке. На рис. 16 мы имеем цепь, составленную из катушки C , ключа S и батареи B . Если ключ замкнут, ток протекает через катушку и создает магнитное поле. Его силовые линии изображены на рис. 13, б. Видно, что они пересекают витки катушки. Если разорвать цепь, разомкнув ключ, ток прекратится и магнитное поле начнет исчезать. При этом поток через катушку C изменится на большую величину за очень короткое время. Тогда, как требует закон индукции, в проводе катушки возникает мощное электрическое поле и, стало быть, развивается большая электродвижущая сила. Ее обычно бывает достаточно, чтобы заставить заряды течь в воздушном зазоре

ключа S , отчего возникает видимая искра. Наведение электродвижущей силы в катушке полем, образованным током, протекающим в ней самой, известно под названием самоиндукции. Цепи, подобные рис. 16, используются для получения искры зажигания в большинстве типов автомобильных двигателей.

Поучительно взглянуть на явление самоиндукции несколько с другой стороны. Как мы увидим дальше, электрические и магнитные поля содержат в себе запасенную энергию. Поэтому катушка на рис. 16, создающая интенсивное магнитное поле, накапливает за время прохождения в ней тока значительное количество энергии. Эта запасенная энергия из-за закона сохранения не может исчезнуть, а может лишь перейти в другую форму. Следовательно, когда мы разорвем цепь, в какой-то части нашей системы должна быть произведена работа. Видимая искра очень ясно показывает, где именно это происходит. Ее свечение свидетельствует о том, что воздух в зазоре ключа сильно нагрелся, и, таким образом, процесс, происходящий в катушке, можно охарактеризовать как переход магнитной энергии в тепло. Магнитная энергия катушки стремится, тем самым, воспрепятствовать исчезновению тока, подобно тому как кинетическая энергия большого маховика противодействует всяким попыткам остановить его.

Окончательная формулировка законов

Вернемся теперь к нашему описанию основных законов поля. В том виде, в каком мы их получили, они применимы к явлениям, с которыми обычно сталкивается инженер-электротехник, если, конечно, он не занимается очень высокими частотами. Они правильно описывают происходящее в обыкновенных электрических цепях, генераторах, моторах, трансформаторах и т. д. Однако Кларк Максвелл показал, что эти законы несовместимы друг с другом и что из них можно вывести противоречивые заключения. Чтобы убедиться в этом, вообразим себе переменный ток, текущий по прямолинейному проводу AB (рис. 17). Когда ток движется от A к B , он переносит заряд слева направо, и поэтому положительные заряды

скапливаются в конце B , а отрицательные на A . Этот процесс не может продолжаться до бесконечности, потому что накопленные заряды создадут электрическое поле, стремящееся изменить направление тока. Но можно себе представить, что ток течет в первоначальном направлении лишь очень короткое время, а затем меняет его, совершая периодические колебания. Как создать такой переменный ток в действительности, нам пока не важно.

Рассмотрим теперь магнитное поле, созданное этим током. Мы ожидаем на основании сформулированных

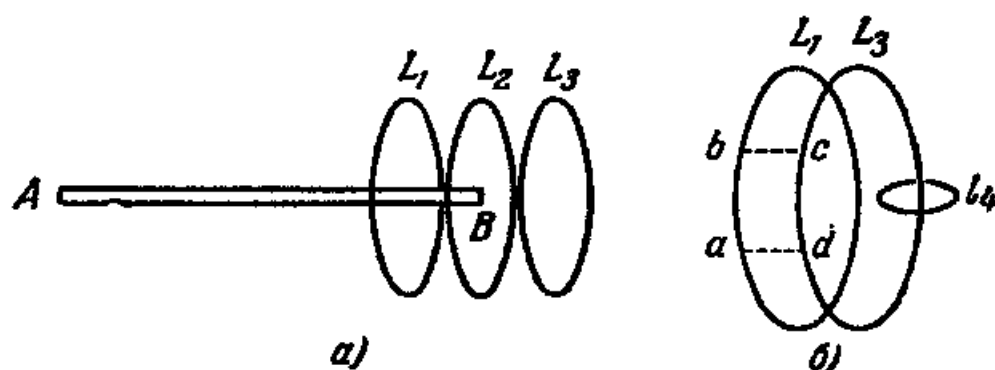


Рис. 17. a — переменный ток в проволоке; b — кажущееся противоречие.

нами законов, что его силовые линии будут окружностями с проводом в центре. Действительно, циркуляция по контуру, расположенному подобно L_1 , должна быть отлична от нуля, поскольку ток пересекает его плоскость. Но мы уже не сможем с уверенностью сказать, что происходит на контуре L_2 , потому что его плоскость проходит как раз через точку B , где ток прекращается. Наконец, мы ожидаем, что на контуре L_3 , который вообще не пересекается током, магнитное поле отсутствует. Следовательно, как мы должны заключить на основании наших законов, магнитное поле отлично от нуля на контуре L_1 и равно нулю на L_3 . Это, однако, невозможно. Рассмотрим рис. 17, b , где в увеличенном виде изображены контуры L_1 и L_3 , и спросим себя, чему равна циркуляция по воображаемому замкнутому контуру $abcd$. Когда мы передвигаем магнитный полюс от a к b , силы поля совершают над ним работу. Никакая работа не совершается между b и c или a и d , так как здесь полюс движется в направ-

лении, параллельном проводу, а силовые линии поля, созданного током, всегда лежат в перпендикулярной к нему плоскости. Разумеется, работа не совершается и на участке cd , поскольку при этом мы находимся на контуре L_2 , на котором, по нашему утверждению, магнитное поле отсутствует. Мы заключаем, следовательно, что циркуляция вдоль малого контура $abcd$ отлична от нуля. Но это противоречит нашим законам магнитного поля, ибо никакой ток через контур не проходит, и поэтому, как показывает наша аргументация, в формулировке законов чего-то не хватает. Как показал Максвелл, существует единственный способ избежать этих противоречий. Именно, нужно предположить, что циркуляция магнитного поля отлична от нуля, когда имеется переменное электрическое поле, даже в отсутствие токов.

Проверим, что это снимает все противоречия. Действительно, в каждый момент времени в точках A и B на рис. 17 находятся равные и противоположные заряды. Пусть для простоты рассуждений заряд B будет положительным. Тогда силовые линии электрического поля идут от B к A подобно тому, как изображено на рис. 9, б, причем часть их пересекает контур L_2 , а часть — L_1 . В то время, когда ток в проводе достигает максимального значения, максимальной будет и скорость, с какой заряды накапливаются на его концах, поэтому быстрота изменения заряда, а следовательно, и электрического поля, всегда следует за током. Если изменение электрического потока создает циркуляцию магнитного поля, то последняя уже не будет равна нулю вдоль контуров L_2 и $abcd$. Кроме того, уменьшится циркуляция вдоль L_1 .

Чтобы сделать наши выводы совершенно точными, нужно постулировать, что циркуляция магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура состоит из двух частей: первая, как и раньше, равна полному току, пересекающему контур, умноженному на $\frac{4\pi}{c}$, а вторая — величине $\frac{1}{c}$, умноженной на быстроту изменения электрического потока, т. е. числа электрических силовых линий, проходящих через контур.

Мы не сможем дать количественного доказательства того, что введенный нами член устраняет все трудности, а также показать, что наши дополненные законы не будут друг другу противоречить.

Чтобы подчеркнуть, что меняющийся электрический поток производит магнитный эффект подобно току, Максвелл в своих работах использовал термин «ток смещения», понимая под этим, что некий вид тока, не сопровождающийся переносом какого-либо заряда, протекает в пустом пространстве, когда в нем меняется электрическое поле. Это понятие связано с физической картиной, уже вышедшей в наши дни из употребления, и мы не будем его применять.

Мы теперь в состоянии дать следующую окончательную формулировку законов электромагнитного поля.

Магнитное поле всюду является свободным. Электрическое поле свободно в точках, где нет зарядов; разность между числом электрических силовых линий, входящих в данный объем и выходящих из него, равна суммарному заряду в этом объеме. В отсутствие переменных магнитных полей электрическое поле является безвихревым. Циркуляция электрической напряженности вдоль произвольного замкнутого контура равна скорости изменения магнитного потока через него, умноженной на $\frac{1}{c}$.

Магнитное поле является безвихревым, если нет токов и переменных электрических полей. Его циркуляция по контуру равна току, пересекающему этот контур, умноженному на $\frac{4\pi}{c}$, минус умноженную на $\frac{1}{c}$ быстроту изменения электрического потока через него.

Новый член, добавленный нами к законам, несуществен, пока мы имеем дело с малыми частотами и системами умеренных размеров. Для обычно употребляемых напряженностей электрического поля изменение электрического потока при этих частотах оказывается на практике настолько малым, что возникающим при этом магнитным полем можно полностью пренебречь.

Положение, однако, меняется при высоких частотах. Чтобы понять, что же здесь происходит, вернемся опять к рис. 17, а. Как мы уже видели, магнитное поле про-

стирается за конец провода, так как должна быть отлична от нуля циркуляция по контуру L_1 . Оно является, конечно, переменным, поскольку ток и все вместе с ним изменяет направление много раз в секунду. Следовательно, вдоль контура L_1 имеется переменное магнитное поле и оно в свою очередь создает согласно закону индукции электрическое поле. Например, малый контур l_1 охватывает теперь линию, магнитный поток вдоль которой меняется, и поэтому вдоль него самого действуют электрические силы. Проследив за строением электромагнитных силовых линий, мы найдем, что напряженность электрического поля на контуре l_1 уже не может полностью принадлежать электрическим силовым линиям, соединяющим A с B . Стало быть, существуют какие-то новые линии и, поскольку нет никаких других зарядов, кроме A и B , эти линии должны быть замкнутыми.

Таким образом, электрическое поле распространяется за контур L_1 и по нашему новому закону должно создать магнитное поле еще дальше от конца провода. Последнее в свою очередь создаст согласно закону индукции электрическое поле, и так далее. В результате окажется, что электрическое и магнитное поля распространятся в пространстве гораздо дальше, чем можно было бы ожидать в статическом случае. При помощи наших грубых методов без использования математических выкладок нельзя найти вид этих полей. Строгое решение математической задачи показывает, что это будут волны. Мы проверим только, что такие волны находятся в согласии с нашими основными законами, т. е. с уравнениями Максвелла.

Электромагнитные волны

Типичная электромагнитная волна изображена на рис. 18. Она распространяется вдоль оси OX , и в каждый момент времени электрическое поле имеет одинаковые величину и направление во всех точках любой плоскости, перпендикулярной к этой оси. Другими словами, если мы выберем на линии OX какую-нибудь точку, электрическое поле в ней будет таким же, как и в точках над ней, или за ней и перед ней. Все сказанное справедливо также и для магнитного поля. Достаточно поэтому отмечать

только, как меняется поле вдоль самой оси. На рисунке величины полей в некоторый момент времени показаны стрелками. Как видно, электрическое поле везде вертикально, но в одних точках направлено вверх, а в других вниз. Магнитное поле составляет прямой угол с электрическим и с направлением распространения, оно направлено попеременно к читателю или от него. С течением времени вся картина передвигается в направлении от O к X .

Остановим теперь наше внимание на некоторой точке P и рассмотрим маленький прямоугольный контур высоты

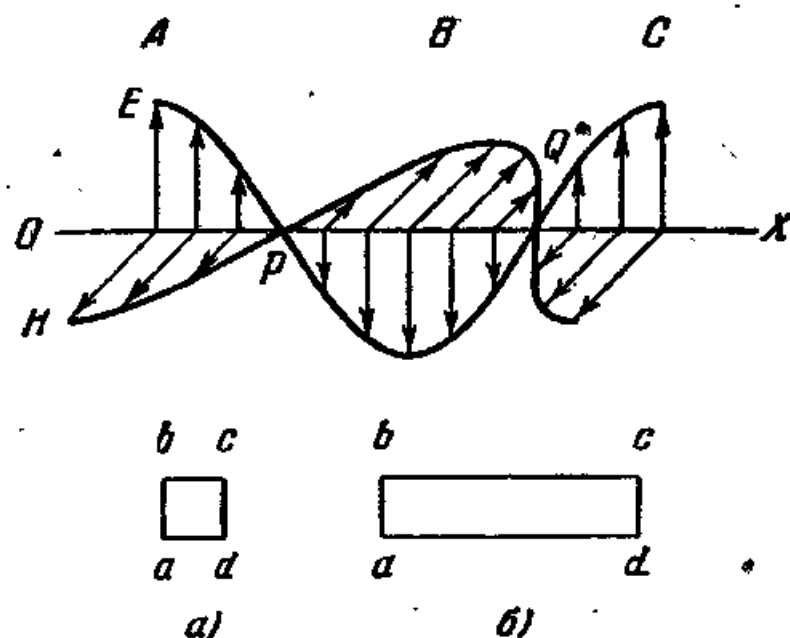


Рис. 18. Электромагнитная волна:
 a — вблизи точки P ; b — от A до B .

l , расположенный вблизи нее, как показано на рис. 18, a . Вдоль этого контура электрические силы действуют по часовой стрелке, так как напряженность поля, направленная на левом его краю вверх, больше, чем напряженность на правом, а на верхнем и нижнем краях вообще нет горизонтального поля. Следовательно, если пронести заряд из a в b , над ним будет произведена работа, которая не компенсируется отрицательной работой на пути из c в d . Этот результат находится в согласии с основными законами, потому что возрастает магнитный поток через контур. Действительно, напряженность магнитного поля направлена к читателю и ее величина возрастает, когда со временем вся картина сдвигается вправо. Вблизи таких

точек, как Q , магнитный поток убывает, поскольку здесь величина напряженности магнитного поля падает со временем. Но в этом случае величина электрического поля возрастает слева направо, так что электрические силы вдоль контура будут действовать против часовой стрелки. Нарисовав маленький горизонтальный контур, мы могли бы проверить, что действие магнитных сил вдоль него согласуется с быстротой изменения электрического потока. Итак, мы видим, что волна качественно не противоречит нашим законам. Однако количественное согласие может быть получено только в том случае, если правильно найдена скорость распространения волны.

Чтобы убедиться в этом, мы введем «длину волны» λ , т. е. расстояние, после которого форма волны полностью повторяется. Ей соответствует, например, расстояние от A до C . Рассмотрим теперь вертикальный прямоугольный контур со стороной, равной половине длины волны; высота его пусть снова равна l . Тогда циркуляция электрического поля вдоль него равна $2El$, где E — максимум напряженности, так как работа, совершаемая на единичным электрическим зарядом, есть El , когда он проходит снизу вверх по левому краю контура, и снова El , когда он движется сверху вниз по правому. Циркуляция электрической силы должна равняться скорости изменения магнитного потока через контур, умноженной на $\frac{1}{c}$. В рассматриваемый момент времени магнитный поток равен нулю, потому что он направлен от читателя на одной половине контура и к читателю на другой. Однако со временем он изменяется.

Рассмотрим картину волны в некоторый более ранний момент, отстоящий от начального на $\frac{t}{4}$, где t — время, за которое волна проходит расстояние, равное своей длине. Тогда A и B попадут в узлы волны, т. е. в точки, где электрическое и магнитное поля исчезают, и среднее значение магнитного поля между A и B в этот момент будет равно среднему значению его H_m между двумя узлами. Поток через контур есть H_m , умноженное на площадь, охватываемую контуром, или $\frac{1}{2} \lambda H_m$. С другой

стороны, в некоторый более поздний момент A и B снова станут узлами, но направление магнитного поля будет противоположным. Мы можем поэтому сказать, что за время $\frac{t}{2}$ поток через контур изменится на λH_m , и, следовательно, средняя быстрота его изменения за этот период есть $\frac{\lambda H_m}{\frac{1}{2}t}$.

Однако нам нужна не средняя быстрота изменения, а максимальная, потому что в рассматриваемый нами момент времени быстрота изменения потока через данный контур является наибольшей. Быстрота изменения меняется со временем по тому же закону, что и магнитное поле, поэтому мы получим максимальную быстроту изменения, если подставим в выражение для потока вместо среднего поля H_m максимальное поле H . Приравняв циркуляцию электрического поля скорости изменения магнитного потока, умноженной на $\frac{1}{c}$, найдем:

$$2E = \frac{\lambda H}{\frac{1}{2}ct}, \quad \text{или} \quad E = \frac{\lambda H}{ct}.$$

Мы определили t как время, за которое волна проходит расстояние, равное своей длине λ , и, стало быть, $\frac{\lambda}{t}$ есть скорость волны v . Отсюда следует, что $E = \frac{v}{c} H$.

Применяя таким же способом другой закон, который связывает магнитную циркуляцию вдоль контура с изменением электрического потока, можно найти, что $H = \frac{v}{c} E$. Другими словами, E и H относятся друг к другу, как v к c , согласно первому закону, и как c к v , согласно второму. Это возможно, очевидно, только если $v=c$ и $H=E$.

Итак, мы установили следующие свойства электромагнитных волн: в электромагнитной волне равны напряженности электрического и магнитного полей; они направлены под прямым углом друг к другу и к направлению распространения; скорость распространения такой волны равна c .

Вскоре после того, как Максвелл вывел эти результаты из законов электромагнитного поля, Г. Герц доказал

существование таких волн экспериментально и тем самым укрепил веру в максвелловские рассуждения. В виде радиоволн эти электромагнитные волны используются для передачи сигналов, речи и изображений. Наш примитивный рис. 17 содержит принцип устройства простейшей радиоантенны. На практике к нему следует присоединить некоторые приспособления для возбуждения в проводе токов высокой частоты.

Наши рассуждения также показывают, что электромагнитная волна поперечна, т. е. электрические и магнитные поля в ней всегда перпендикулярны к направлению распространения. Действительно, если бы мы попытались изменить наш рисунок, взяв оба поля или одно из них параллельно оси OX , то мы не смогли бы получить согласия с основными законами.

Рассматривая такую поперечную волну, мы можем спросить о состоянии ее «поляризации». Например, в волне, изображенной на рис. 18, электрическое поле всегда лежит в вертикальном направлении. С равным правом мы могли бы нарисовать волну, распространяющуюся вдоль OX , с электрическим полем в горизонтальном, а магнитным — в вертикальном направлениях. Эти волны вполне отличимы одна от другой. Так, радиоприемник с вертикальной прямолинейной антенной реагировал бы только на первую из них.

Другая возможная форма получается, если скомбинировать две волны с одинаковой длиной и общим направлением распространения, взяв одну из них с электрическим полем в вертикальном направлении, а другую — в горизонтальном и сдвинув одну относительно другой таким образом, чтобы узлы первой находились на четверть длины волны позади узлов второй. Рассмотрим теперь точку, подобную точке A на рис. 18, в которой в этот момент электрическое поле первой волны направлено вверх. Когда комбинированная волна сместится на четверть своей длины, электрическое поле первой волны спадет до нуля, но как раз в этот момент поле второй достигнет своего максимального значения и будет направлено, например, вперед на читателя. По прохождении второй четверти узел второй волны снова попадет в точку A и горизонтальная составляющая поля обратится в нуль,

но зато появится вертикальная составляющая от первой, теперь направленная вниз, и так далее. Можно показать, что в рассматриваемом случае электрическое поле всегда сохраняет постоянную величину, а его направление меняется с постоянной скоростью, проходя последовательно положения вверх, вперед, вниз, назад. Такую волну называют волной с правой круговой поляризацией. В левополяризованной волне электрическое поле вращается в обратном направлении.

Точно так же, как мы построили волну, поляризованную по кругу, из двух плоско-поляризованных волн, можно, в свою очередь, построить волну с плоской поляризацией, комбинируя две волны с противоположными круговыми поляризациями.

Энергия поля

Наши последние замечания к законам электромагнетизма касаются вопроса об энергии. Рассмотрим два электрических заряда, находящихся на конечном расстоянии один от другого. Они отталкиваются друг от друга и для их сближения необходимо произвести работу против сил отталкивания. Мы вернем эту работу, позволив зарядам снова удалиться. Как и во всех проблемах механики, мы можем мыслить себе такую обратимую работу накопленной в форме потенциальной энергии. Пока мы занимаемся только этой статической задачей, совершенно безразлично, представляем мы себе энергию сосредоточенной в самих зарядах или распределенной в их поле. Однако никакого произвола не останется, если мы обратимся к волновым явлениям, потому что волны переносят энергию, например от радиопередатчика к приемнику. Так как их скорость ограничена, передатчик потеряет энергию раньше, чем приемник соберет ее, и если энергия сохраняется, она некоторое время должна находиться где-то в пространстве между ними. Этим «где-то» может быть только волна, бегущая от передатчика к приемнику, и мы должны поэтому представить себе, что энергия распределена в поле. Чтобы определить ее величину, нужно вычислить, сколько энергии теряют заряды и токи, создающие поле, и вычесть из нее работу, которую поле

могло за это время произвести над другими зарядами и токами.

Мы не будем вдаваться в детали вычислений и приведем сразу ответ: плотность энергии, т. е. энергия в единице объема, равна $\frac{1}{8\pi} (E^2 + H^2)$.

Убедиться в разумности этой формулы для энергии можно, применив ее на частном примере плоскопараллельного конденсатора, рис. 11. Мы видели, что в этом случае электрическое поле между пластинами однородно и $E = \frac{V_2 - V_1}{d}$. Объем пространства между ними есть dA ,

где A — площадь поверхности одной пластины. Поэтому полная энергия, которая равна плотности энергии, умноженной на объем, есть $\frac{(V_1 - V_2)^2 A}{8\pi d}$. Вспомним теперь, что

заряд единицы поверхности пластины равен $\frac{V_1 - V_2}{4\pi d}$, а

следовательно, полный заряд $Q = \frac{(V_1 - V_2) A}{4\pi d}$. Оконча-

тельно, наше выражение для энергии поля дает для полной энергии конденсатора величину $\frac{1}{2} (V_1 - V_2) Q$. С первого

взгляда естественно подумать, что энергия должна бы быть вдвое большей, потому что конечное состояние конденсатора можно создать, начав с нейтральных пластин и перенося затем заряд с одной на другую. Так как потребная для этого энергия есть величина заряда, умноженная на разность потенциалов, полная энергия, казалось бы, равна $Q(V_1 - V_2)$. Однако мы должны учесть, что когда пластины были не заряжены, разность потенциалов между ними равнялась нулю, и поэтому, если мы переносили заряд постепенно, он вначале двигался против нулевой разности потенциалов и последняя лишь только к концу достигла значения $V_1 - V_2$. Средняя разность потенциалов, против которой мы совершали работу, равна $\frac{1}{2} (V_1 - V_2)$,

а это подтверждает правильность нашего результата.

То, что магнитное поле также несет в себе энергию, было ясно уже во время обсуждения явления самоиндукции.

Читатель, в какой-то степени знакомый с электричеством и магнетизмом, возможно будет удивлен, что на протяжении этой главы мы ни разу не упомянули о диэлектрической постоянной и магнитной проницаемости или об электрической индукции D и магнитной индукции B . Однако эти величины не появляются в основных законах, они нужны лишь для описания поведения материальных тел в электрических и магнитных полях, которое в принципе может быть объяснено атомной структурой тел. С этой точки зрения величины, подобные магнитной индукции, являются удобными математическими конструкциями, полезными для описания того, как системы, состоящие из большого числа атомов, реагируют на электрическое или магнитное поле. Они — следствие общих законов физики.

ГЛАВА 3

СВЕТ

Спектр. Интерференция. Волны

Ньютон, положивший начало механике, интересовался также и свойствами света. Среди прочих явлений он занимался спектрами, т. е. системами цветных полос, получающимися, если пропустить узкий пучок света через кусок стекла с непараллельными гранями. Наиболее известным примером спектра является радуга, возникающая в дождевых каплях, освещенных солнцем. В лабораториях для наблюдения этого явления обычно используют призму, которая представляет собой стеклянный брусок треугольного сечения.

Во всех случаях мы видим вместо белого света полосу, окрашенную «всеми цветами радуги», начиная с красного на одном конце, минуя затем оранжевый, желтый, зеленый и синий, до фиолетового на другом. Ньютон объяснял появление спектра тем, что белый свет в действительности есть смесь всех цветов, а призма или дождевая капля лишь отделяют их один от другого.

Это обусловлено преломлением, происходящим, когда луч света падает наклонно на границу между двумя прозрачными средами, в нашем случае между стеклом и воздухом или воздухом и водой. При прохождении через такую границу луч отклоняется от своего первоначального направления. Наиболее просто это можно заметить, опустив в воду конец трости под углом к ее поверхности. Трость представляется тогда нашему взгляду переломленной в месте соприкосновения с водой (рис. 19). Спектр появляется благодаря тому, что лучи различных цветов, входящих в состав белого цвета, преломляются по-разному.

На рис. 20 сплошными линиями показан путь фиолетового света, а пунктирными — путь красного.

Мы не будем здесь входить в объяснение, отчего происходит преломление, так как это потребовало бы знания

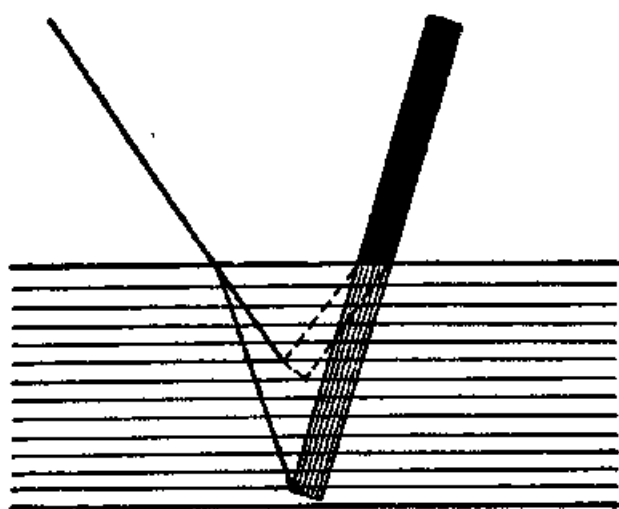


Рис. 19. Преломление.

атомной структуры прозрачных сред. Важно лишь ясно представлять себе, что мы можем надеяться найти какие-либо простые законы только для чистого цвета. Его мы выделим, пропуская, например, белый свет через призму и ставя затем на его пути непрозрачную пластинку с узкой щелью, которая вырежет участок спектра определен-

ного цвета. Такой свет чистого цвета называется монохроматическим светом, а прибор, который выделяет его из белого света, — монохроматором.

Проще всего, однако, получать монохроматический свет непосредственно от особого источника света. Для этой цели можно использовать газовую горелку, поместив в ее пламя какое-нибудь вещество, содержащее натрий, например обычную поваренную соль. Это дает желтый свет, оказывающийся практически монохроматическим. Такой же свет испускает электрическая разрядная трубка, наполненная парами натрия, которая иногда используется для уличного освещения. Причины этого будут ясны позднее.

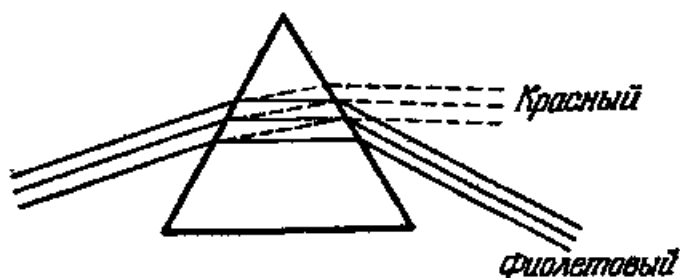


Рис. 20. Призма.

Ньютон наблюдал также «интерференцию» света. Типичная интерференционная картина возникает, если осветить тонкую стеклянную пластинку, грани которой с

большой точностью параллельны, каким-нибудь источником монохроматического света, например пламенем паров натрия. Тогда изображение пламени в свете, отраженном от пластинки, будет пересечено чередующимися светлыми и темными полосами, называемыми интерференционными. Ньютон не нашел объяснения интерференции. Это было сделано позже в работах Френеля и Гюйгенса. Они показали, что можно было бы ожидать появления таких интерференционных полос, если бы свет состоял из волн.

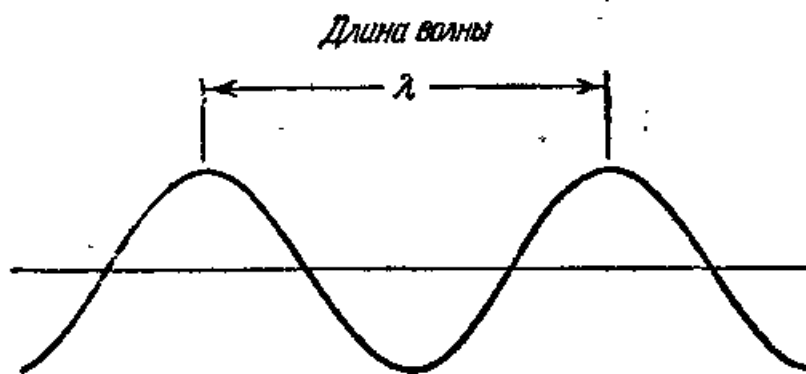


Рис. 21. Волна.

Волны известны во многих различных отраслях физики. Они возникают, когда какая-нибудь протяженная среда возмущается внешней силой. Типичным примером из нашей повседневной жизни служат волны на поверхности воды. Их можно наблюдать в ветреную погоду на море или бросив камень в пруд. В последнем случае они имеют форму правильных концентрических окружностей, расходящихся от места падения камня, и в сечении выглядят подобно рис. 21. Здесь прямая горизонтальная линия изображает поверхность воды в момент, предшествующий прохождению волны, а волнистая линия — возмущенную поверхность. Она состоит из следующих друг за другом с правильными интервалами гребней, с провалами (впадинами) между ними. Расстояние между соседними гребнями называется длиной волны и обычно обозначается греческой буквой λ . Число гребней волны, проходящих в секунду через фиксированную точку, называется частотой. Она равна скорости волны, деленной на ее длину.

Другой тип волнового движения представляет собой звук. Мы знаем, что звук есть волновое движение воздуха, в котором он распространяется. Если звук соответствует чистой музыкальной ноте, мы снова имеем простую волну, подобную рис. 21, только теперь кривая изображает не форму водяной поверхности, а изменение давления воздуха. На гребнях волны воздух сжимается, а во впадинах расширяется по сравнению с нормальным состоянием. Когда волна движется, движутся и ее гребни и впадины, и поэтому точка, которая в некоторый момент находилась во впадине, попадает по прошествии полуволны на гребень. Это означает, что воздух вблизи этой точки, который ранее находился при пониженном давлении, начнет сжиматься, а значит, некоторое количество воздуха должно притекать к этой точке из соседних. Когда проходит другая полуволна, такое же количество воздуха должно уйти обратно. Следовательно, в этом случае воздух движется в том же направлении, что и волна, т. е., на нашем рисунке, слева направо и справа налево попеременно. Такая волна называется продольной. С другой стороны, в волне на воде ее поверхность попеременно поднимается и опускается и движение происходит в основном под прямым углом к направлению распространения волны; в этом случае мы говорим о поперечных волнах.

С электромагнитными волнами мы уже встречались в предыдущей главе; как мы скоро увидим, они очень тесно связаны со светом.

Однако для того, чтобы понять, как происходит интерференция, нет нужды интересоваться природой волны. Достаточно только знать, что существует некая величина, которая колеблется, как показано на рис. 21.

Рассмотрим такую волну, отраженную от стеклянной пластинки (рис. 22). Наклонные линии S_1 и S_2 изображают ее поверхности. Волна падает слева, и ее гребни находятся в заштрихованных областях. Часть света отразится от передней поверхности пластинки. В момент времени, показанный на рисунке, один из гребней как раз достигает этой поверхности и, следовательно, начинает отражаться от нее вверх. В некоторый более ранний момент (легко сообразить, что он отстоит от рассматривае-

мого на время, за которое волна проходит расстояние, равное своей длине) через поверхность S_1 проходил предшествующий гребень, из него возник отраженный гребень c_1 , который к рассматриваемому моменту уже прошел расстояние, равное длине волны. Еще раньше возник гребень c_2 , и так далее.

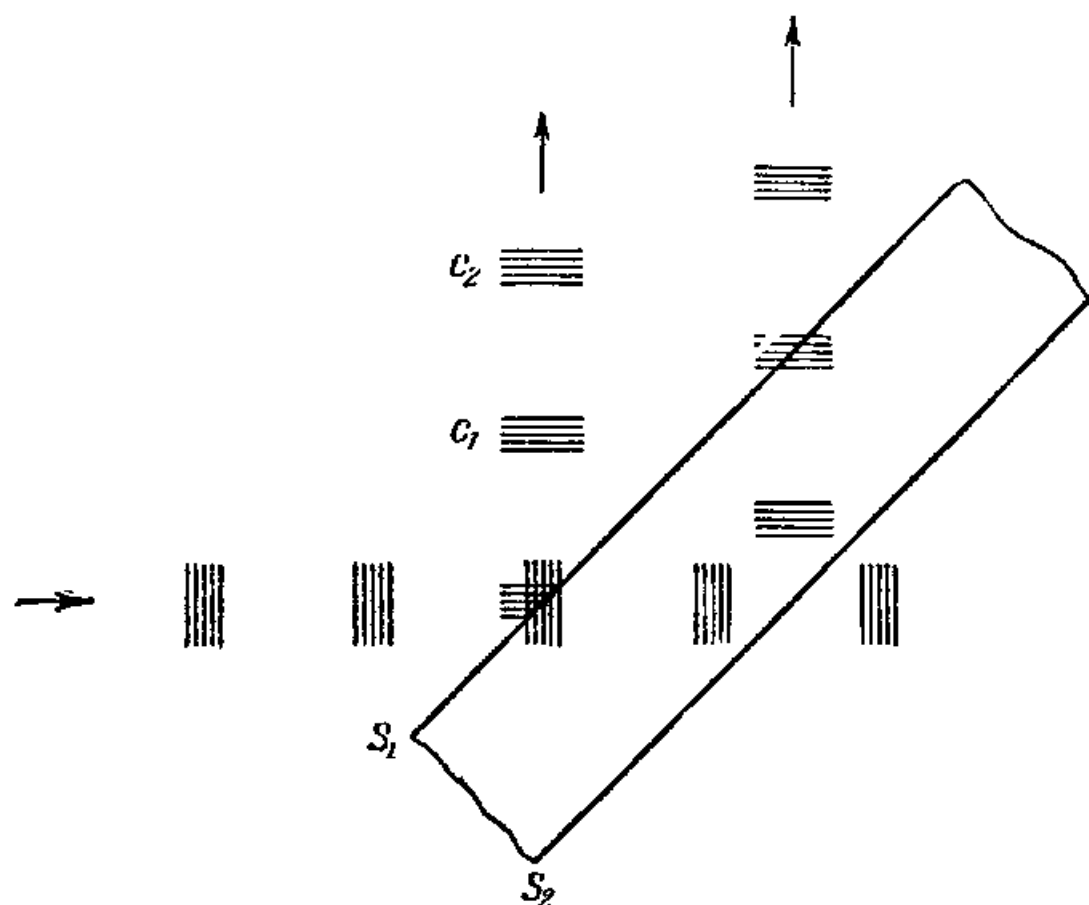


Рис. 22. Интерференция в стеклянной пластинке.

От поверхности стеклянной пластинки отражается только малая часть световой волны, остаток же продолжает двигаться дальше, пока не достигнет задней поверхности S_2 пластинки (в действительности, благодаря преломлению, направление прошедшей волны несколько изменится, но мы для простоты пренебрежем этим эффектом). При выбранных на рисунках условиях в рассматриваемый момент времени через заднюю поверхность проходит впадина и по тем же причинам, что и раньше, в движущейся вверх отраженной волне в этом месте также образуется впадина. Ближайший к ней гребень к рассматриваемому моменту времени уже успел удалиться на половину длины волны вверх.

Таким образом, мы убеждаемся, что в обеих отраженных волнах, идущих одна от передней стенки пластинки, а другая от задней, гребни располагаются в шахматном порядке. На той высоте, где у первой — гребень, у второй — впадина и наоборот. Эти волны на самом деле частично перекрываются. Мы изобразили их очень узкими, ибо в противном случае рисунок был бы непонятен. В действительности же как падающая, так и отраженная волны имеют заметную ширину. Обе отраженные волны движутся вверх, накладываясь одна на другую, и, так как первая создает гребень там, где у второй была впадина, результатом наложения окажется их полное исчезновение. Поэтому при условиях, выбранных на рисунке, мы совсем не увидели бы отраженного света.

Это заключение, очевидно, сильно зависит от соотношения между величиной пути, проходимого волной в стекле, и ее длиной. Взяв немного более толстую пластинку, мы обнаружили бы, что момент прихода гребня на S_1 совпал с приходом другого гребня на S_2 , и тогда отраженные волны, напротив, усиливали бы друг друга. Результат чувствителен также и к величине угла, под которым свет падает на пластинку. Если мы немного повернем пластинку в сторону вертикали, путь волны в стекле уменьшится и мы снова придем к положению, когда волны усиливают друг друга. Это как раз та ситуация, с которой мы столкнулись, рассматривая изображение пламени в свете, отраженном от пластинки. Мы видим различные участки пламени под несколько разными углами и поэтому, если свет действительно состоит из волн, мы ожидаем, что в одних направлениях найдем яркое изображение, а в других, наоборот, никакого.

Все детали строения интерференционных полос — их зависимость от толщины и угла наклона пластинки, закон, по которому яркость меняется при переходе от светлой полосы к темной, — полностью согласуются с предположениями волновой теории. Сравнивая расстояние между полосами при данных угле наклона и толщине пластинки, мы можем найти, чему должна быть равна длина волны.

Таким способом определяем, что длина волны видимого света несколько меньше, чем одна десятитысячная часть сантиметра. Например, длина волны желтого света

паров натрия равна приблизительно $6 \cdot 10^{-5}$ см (здесь мы использовали обобщение упоминавшегося раньше приема сокращенной записи больших чисел; под 10^{-5} следует понимать $\frac{1}{100\,000}$, т. е. единицу, деленную на единицу с пятью нулями, или 0,00001, т. е. десятичную дробь с пятью нулями перед единицей). Теперь мы сможем также понять, в чем состоит разница между цветами. Каждый цвет соответствует определенной длине волны. Идя вдоль радуги от красного света к фиолетовому, мы будем находить все более короткие волны. Длина волны у фиолетового света приблизительно в полтора раза меньше, чем у красного:

Если мы попытаемся получить интерференционную картину, пользуясь не монохроматическим светом, а белым, то волны красной части спектра дадут темные полосы в другом месте, чем, например, волны синей, и полученные таким способом цветные полосы будет не так легко увидеть. Они станут гораздо более заметными, если вместо стекла взять тонкую пленку, толщина которой не слишком отличается от длины волны. В этом случае полосы значительно шире и их окраска проступает более отчетливо. Интерференцией в белом свете объясняется цвет мыльных пузырей и масляных пленок на воде.

Дифракция, поляризация, скорость

Другим важным прибором для демонстрации интерференции является дифракционная решетка. Она представляет собой систему параллельных линий, расположенных на равном расстоянии. Например, это могут быть линии, нацарапанные на поверхности зеркала, или натянутые параллельно друг другу тонкие проволоочки. Когда световая волна падает на такую дифракционную решетку, мы получаем картину, подобную изображенной на рис. 23. Здесь кружками показаны сечения линий решетки. Волна распространяется под углом α к плоскости решетки и отражается от каждой из линий (штриховкой снова отмечены гребни падающей и отраженных волн). Отраженные волны накладываются одна на другую и в результате происходит их взаимное усиление или

уничтожение в зависимости от того, находятся ли гребни, возникшие на различных линиях, в одинаковых положениях. На рис. 23, б показан как раз случай взаимного уничтожения. На рис. 23, а волна отражается от

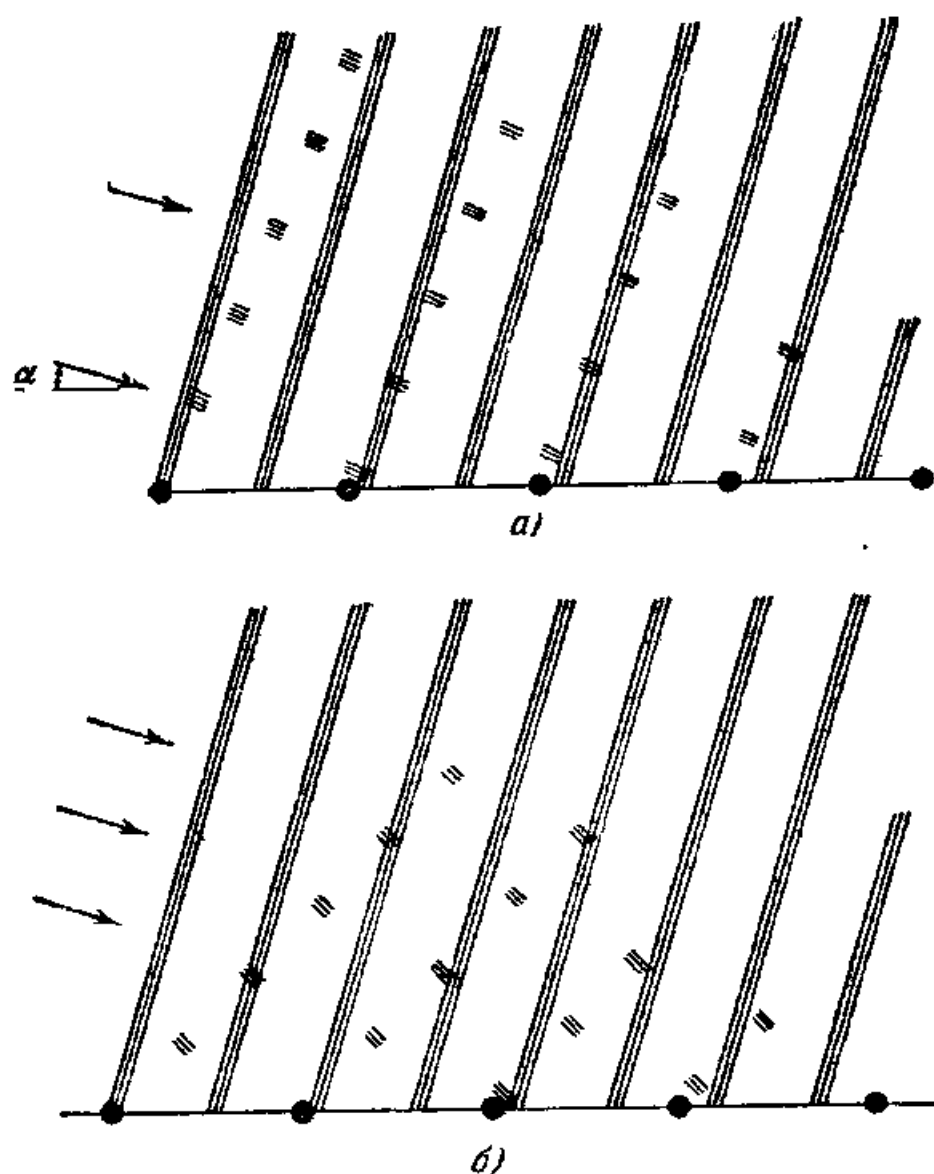


Рис. 23. а — дифракция на дифракционной решетке; б — то же самое в другом направлении.

той же самой решетки, но распространяется в несколько ином направлении. Теперь, как видно, волны усиливают друг друга.

Дифракционные полосы отличаются от интерференционных полос, получаемых при помощи стеклянной пластинки, тем, что здесь складываются не две отраженные волны, а большее их число. В общем случае гребни этих

волн оказываются в самых различных положениях относительно друг друга и поэтому уничтожаются почти по всем направлениям, за исключением узкой области углов, где положения гребней совпадают, или где, как говорят, волны находятся в фазе. Следовательно, такая дифракционная решетка отражает монохроматический свет только в очень жестко определенном направлении и поэтому будет развертывать падающий на нее пучок белого света в четко окрашенные спектры.

Если расстояние между линиями в решетке значительно превосходит длину волны, усиление произойдет только в том случае, когда направления падающей и отраженной волн почти параллельны плоскости решетки. Этим можно воспользоваться для наблюдения дифракции без специальной аппаратуры. Возьмем обычную граммофонную пластинку, поместим ее перед глазами так, чтобы глаз смотрел вдоль ее поверхности, и посмотрим, как отражается свет от какого-нибудь достаточно малого источника, например электрической лампочки. В этом случае бороздки на пластинке действуют подобно дифракционной решетке, и мы увидим несколько изображений лампы, окрашенных всеми цветами спектра. Эта простая демонстрация воспроизводит принцип действия дифракционного спектрографа, при помощи которого физики могут измерять длины световых волн с очень большой точностью.

Тот факт, что нам удастся увидеть спектр, смотря на граммофонную пластинку лишь почти параллельно ее поверхности, свидетельствует о малости длины световой волны по сравнению с расстоянием между бороздками, которое обычно составляет приблизительно $\frac{1}{40}$ см. Оценивая величину угла, под которым видны дифракционные спектры, легко показать, что длина волны в несколько сот раз меньше, чем это расстояние, в согласии с приведенной выше цифрой.

Изучение свойств света показывает также, что он состоит из поперечных волн. Мы можем создать две волны с одинаковыми длиной и направлением распространения, но которые, тем не менее, будут отличаться направлением колебаний в них. В этом случае говорят о различной поляризации света. В наши дни наиболее известен способ получения поляризованного света при помощи поляри-

зационного фильтра, или поляроида. Он представляет собой гибкую пластинку, которая достаточно прозрачна для света, поляризованного в одном определенном направлении, и непрозрачна для света, поляризованного под прямым углом к нему. Если сложить два таких фильтра вместе и вращать затем один относительно другого, можно найти положение, при котором оба фильтра пропускают почти столько же света, сколько каждый из них в отдельности. Если теперь повернуть один фильтр на 90 градусов, прохождение света через них почти полностью прекратится. Этот эффект используется в одной из систем стереокино, в которой иллюзия глубины достигается за счет того, что правый и левый глаза зрителя видят несколько разные изображения, как и действительно бывает, когда мы глядим на какой-нибудь реальный предмет. Зритель надевает очки из поляроида, левое стекло которых пропускает только вертикально поляризованный свет, а правое — горизонтально поляризованный, и на экране кинематографа показываются одновременно два изображения, снятые под разными углами зрения, причем каждое из них проектируется в поляризованном свете.

Все эти факты говорят о том, что свет состоит из поперечных волн. Их скорость очень велика и измерялась различными способами.

Первое измерение скорости света было произведено датским астрономом Рёмером. Он наблюдал траекторию спутника (луны) Юпитера, когда последний находился на максимально близком расстоянии от Земли. Зная траекторию, Рёмер смог вычислить момент, когда спутник должен был оказаться между Землей и Юпитером, что можно было бы заметить по его тени. Однако это произошло несколько позже, чем следовало из его расчетов. Оказалось невозможным объяснить расхождение ошибками в наблюдении траектории или в вычислениях, и Рёмер пришел к выводу, что свет затрачивает конечное время на прохождение пути от Юпитера до Земли. Так как Юпитер к моменту появления спутника успел несколько удалиться, то спутник будет замечен позже. Рёмер определил скорость, какую нужно было бы приписать свету, чтобы устранить это расхождение, и его результат был близок к правильному значению

$3 \cdot 10^{10}$ см в секунду. Это значение с тех пор было многократно проверено как в наблюдениях того же типа, так и в лабораторных экспериментах.

Как мы видели, электромагнитные волны имеют скорость точно такой же величины и тоже являются поперечными. Естественно поэтому считать, что свет — это разновидность электромагнитных волн.

Свет состоит из электромагнитных волн

Эта идея была полностью подтверждена дальнейшими исследованиями. Прежде всего она находит поддержку в соображении, что если свет — это действительно электромагнитные волны, то можно ожидать, что хорошие проводники электричества должны быть непрозрачными. В самом деле, электромагнитная волна содержит в себе электрические поля, которые привели бы в движение заряды в проводнике. Далее, мы знаем, что такое движение сопровождается трением, или «сопротивлением», а следовательно, и переходом энергии зарядов в тепло. По закону сохранения энергии эти потери могут возмещаться только за счет энергии, переносимой электромагнитными волнами, что и приведет к ослаблению этих волн. Поэтому такая волна будет проникать в проводник только до того места, где вся ее энергия перейдет в тепло. Как показывает эксперимент, все металлы действительно сильно поглощают свет. Более подробное изучение явлений, происходящих, когда электромагнитная волна падает на поверхность проводника, приводит к заключению, что большая часть волны отразится. Здесь снова электромагнитная теория света дает правильный результат, ибо еще с древних времен известно, что полированная поверхность металла является хорошим зеркалом.

Зная строение материи, мы можем на основании электромагнитной теории света полностью понять явления испускания и поглощения света, а также отражение и преломление его в различных средах. Этим окончательно подтверждается правильность теории.

Поэтому здесь мы имеем случай, когда целая область физики может быть сведена к основным законам природы, выведенным из другой ее области. Законы электро-

магнитного поля, которые мы изложили в предыдущей главе, содержат в себе все законы, описывающие распространение света. Это, конечно, не означает, что оптика, или учение о свете, стала в наши дни менее важной, чем была ранее. На ее долю осталось приложение известных основных законов к изучению взаимодействия света с различными веществами, построение оптических инструментов и изучение свойств человеческого глаза. Она не содержит больше ничего таинственного, что не могло бы быть понято на основании общих законов. Исключением являются для нас пока квантовые явления, к которым мы вернемся в главе 7.

Таким образом, свет представляет собой волны того же типа, что и электромагнитные, которые используются в радиосвязи. Единственное различие между ними заключается в их длине. Длина световых волн в несколько миллионов раз меньше, чем длина самых коротких из радиоволн, употребляемых, например, в телевидении.

Можно получить невидимые простым глазом электромагнитные волны с длиной, промежуточной между радиоволнами и светом. Длины волн порядка одной сотой сантиметра содержатся в тепловом излучении. Тепло, которое мы ощущаем, поднося руку к горячей печке, возникает от того, что всякое нагретое тело испускает тепловые волны, являющиеся также электромагнитными волнами с длиной, много большей, чем длина волны света, но меньшей, чем у радиоволн.

Тепловые волны, которые лишь незначительно длиннее красного света, но гораздо короче радиоволн, называются инфракрасным излучением. Они в большом количестве испускаются телами, нагретыми почти до красного каления, т. е. еще недостаточно горячими, чтобы излучать видимый свет.

Будем повышать температуру какого-либо тела, например металлической проволоки. При некоторой температуре она начнет испускать видимый красный свет. С дальнейшим повышением температуры цвет тела делается белым, т. е. излучение будет покрывать весь интервал видимого спектра. При этих же температурах тело начнет испускать свет, снова невидимый простым глазом.

Такие еще более короткие волны, примыкающие к фиолетовому концу спектра, известны под названием ультрафиолетового излучения. Ультрафиолетовое излучение на практике получают из электрических разрядных трубок. Одним из распространенных их видов является ртутная лампа, дающая достаточно интенсивное излучение в ультрафиолетовой области.

Если увеличивать разность потенциалов между концами разрядной трубки, мы будем получать ультрафиолетовое излучение со все меньшей и меньшей длиной волны. Когда она достигнет тысячных долей от длины волн видимого света, свойства излучения снова изменятся и оно будет называться уже рентгеновскими лучами. Волны, длина которых в несколько тысяч раз меньше, чем у рентгеновских лучей, называются гамма-лучами. С ними мы еще столкнемся в дальнейшем.

Многообразие названий для электромагнитных волн разной длины указывает только на то, что они различаются способами, посредством которых их можно наиболее удобно получить, воздействием на вещество, а также методами, которыми их обычно обнаруживают. Общие же законы электромагнитного поля применимы к ним в одинаковой мере во всем интервале от радиоволн до гамма-лучей. Поэтому можно сказать, что в этой главе мы не узнали ничего нового об основных законах природы, а лишь нашли новое поле приложения для законов, которые уже знали. Тем не менее, как мы увидим, свет и другие виды электромагнитного излучения оказались очень существенными при установлении новых законов природы. Их изучение имело стимулирующее влияние как на развитие наших представлений о строении материи, так и на понимание того, в каких уточнениях нуждались основные законы механики и электромагнитного поля.

Корпускулярная теория. Геометрическая оптика

Интересно сравнить волновую теорию света с более ранними теориями. Обычным для того времени представлением было, что лампа или другой источник света испускает мельчайшие частицы, «корпускулы», которые движутся прямолинейно с большой скоростью, пока не

достигнут нашего глаза или фотографической пластинки, или еще какого-нибудь прибора, посредством которого их можно обнаружить. Этим сразу объясняется, почему свет распространяется прямолинейно. Явление преломления легко объяснить, предположив, что на границе между стеклом и воздухом или между двумя другими прозрачными средами на «световые частицы» действуют какие-нибудь подходящие силы. Нечто подобное можно увидеть иногда на крокетной площадке. Представим себе, что площадка состоит из двух частей, одна из которых расположена несколько выше другой и отделена узким и довольно крутым земляным валом. Тогда шар, пущенный с верхней части на нижнюю, опишет в точности такой путь, как и свет, проходящий через границу раздела между стеклом и воздухом. Его направление на нижней площадке не будет таким же, как на верхней, а составит больший угол с границей. Таким образом «корпускулярная теория» в состоянии объяснить искривление световых лучей в линзах и призмах. Предположив, что силы на границе призмы действуют по-разному на корпускулы красного и синего цвета, можно понять также, почему она разделяет лучи различных цветов.

Ограниченность корпускулярной теории сказывается при объяснении дифракции и интерференции, которые твердо устанавливают волновую природу света.

Однако явления дифракции и интерференции существуют только до тех пор, пока мы имеем дело с расстояниями, не очень большими по сравнению с длиной световой волны, и поэтому в большинстве практических случаев мы их вообще не замечаем, если только специально не стремимся к этому. Правда, нам удалось наблюдать дифракционные полосы при помощи граммофонной пластинки, хотя расстояние между ее бороздками значительно превышает длину волны, но здесь нам пришлось смотреть на нее весьма специальным способом, а именно под таким малым углом, чтобы бороздки казались удаленными друг от друга лишь на несколько длин волн.

Волновая теория позволяет нам глубже проникнуть в природу света, но она не была бы вполне удовлетворительной, если бы не сохраняла простых свойств корпускулярной теории там, где последняя применима, т. е. в случае

тел, находящихся на расстояниях очень больших по сравнению с длиной волны. И очень важно, что волновая теория в таких случаях делает точно те же самые предсказания о поведении света, что и простая корпускулярная теория.

Рассмотрим прежде всего один простейший пример, а именно свет, излучаемый во время вспышки фотографической лампы. На очень больших расстояниях от нее он

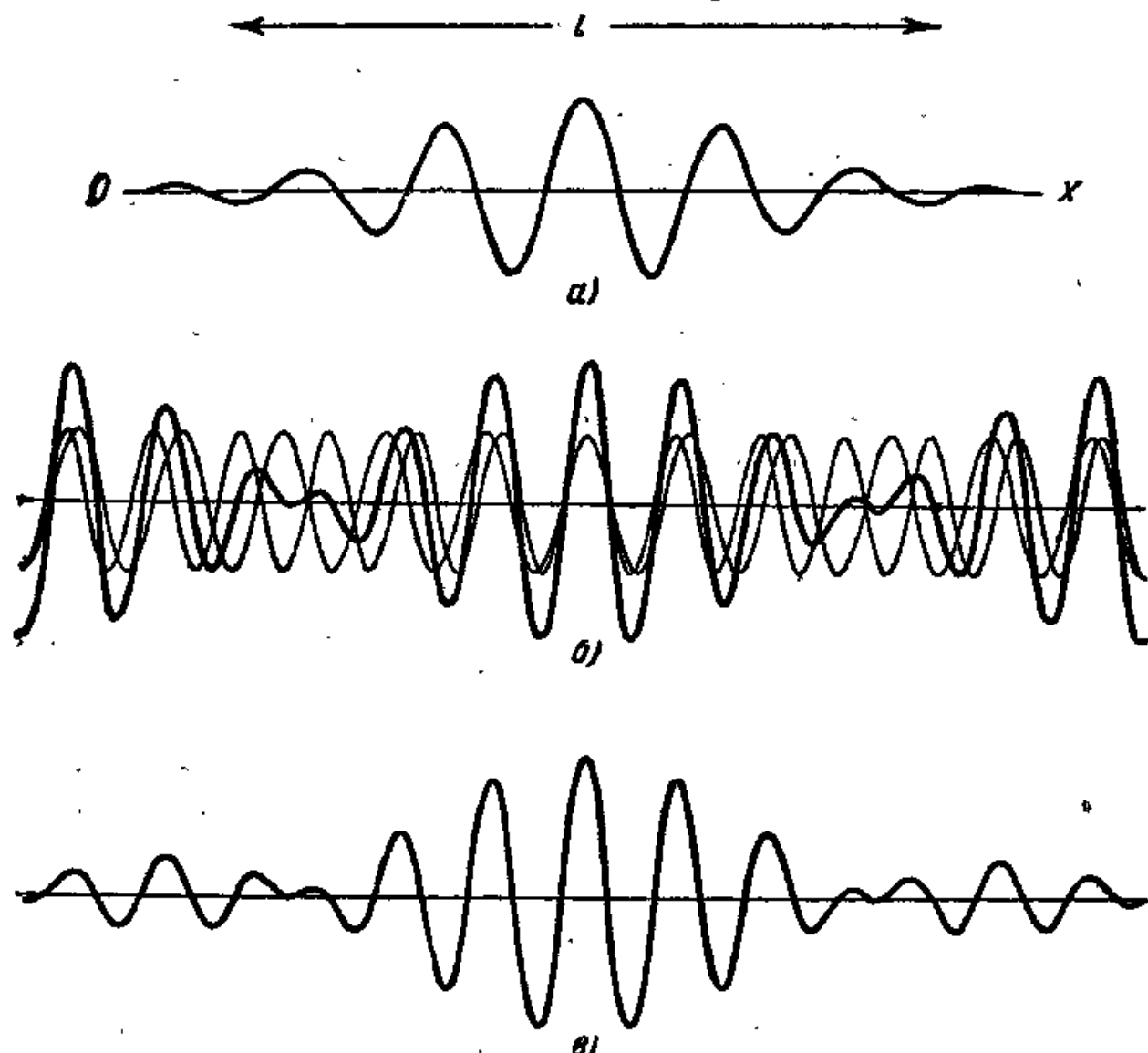


Рис. 24. *a* — волновой пакет; *б* — сложение двух монохроматических волн; *в* — сложение четырех монохроматических волн.

состоит из плоских волн, иными словами, простирается далеко в направлении, перпендикулярном к их распространению, но длится короткое время.

Если изобразить, как выглядит электрическое поле такого света в некоторый момент времени, мы получим картину, подобную рис. 24, *a*. Ox есть линия, вдоль

которой распространяется свет; в каждой ее точке электрическое поле направлено вертикально. Кривая отличается от виденных нами раньше тем, что она не продолжается до бесконечности, а заключена в малой области. Внутри этой области поле совершает правильные колебания (см. рис. 21).

Волна этого типа называется волновым пакетом. Волновой пакет можно построить из большого числа обычных простирающихся в бесконечность волн, но с несколько отличающимися друг от друга длинами. Чтобы убедиться в этом, посмотрим на рис. 24, б. Здесь тонкими линиями изображены две периодические волны с близкими частотами. Жирная кривая получена путем их сложения и, тем самым, представляет результат их совместного действия. Эта кривая изображает так называемые биения, т. е. колебания, которые сильны в местах, где исходные волны усиливают друг друга, и слабы там, где они действуют в противоположных направлениях. Биения хорошо известны в музыке, когда две одновременно звучащие близкие ноты дают трель.

В этом примере мы, используя только две периодические волны, получили волну с повторяющимися областями большой интенсивности. На рис. 24, в приведен результат сложения четырех периодических волн. Здесь заметная интенсивность наблюдается в значительно меньшем числе областей, поскольку в некоторых из них, где какие-нибудь две волны усиливают друг друга, остальные две действуют в противоположном направлении. Однако и в этом случае все же остается много областей с большой интенсивностью. Прибавляя все больше и больше волн, с длинами, лежащими в интервале между двумя исходными, мы будем тем самым отодвигать области с заметной интенсивностью все дальше и дальше в сторону. Идя таким путем, мы можем получить волновой пакет рис. 24, а в качестве предельного случая.

Легко найти наибольшую и наименьшую длину волны из тех, которые требуются, чтобы построить волновой пакет, подобный изображенному на рис. 24, а. Нужно только вспомнить, что волны должны быть в фазе в центре волнового пакета, чтобы дать там наибольшую интенсивность, и должны уничтожать друг друга на его

концах. Если $\frac{l}{2}$ есть расстояние от центра до конца пакета, а λ_1 и λ_2 — наименьшая и наибольшая длины волн соответственно, то на расстоянии $\frac{l}{2}$ первая волна совершит $\frac{l}{2\lambda_1}$ полных колебаний, а вторая — $\frac{l}{2\lambda_2}$. Так как в конце этого интервала волны должны уничтожиться, эти числа отличаются друг от друга не меньше, чем на $\frac{1}{2}$. Следовательно, волновой пакет длины l можно построить лишь при условии, что длины волн, которые мы используем, покрывают такой интервал, что $l\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = 1$. Этот результат упрощается, если ввести вместо длины волны «волновое число» k , равное обратной длине волны $\frac{1}{\lambda}$, или числу волн в одном сантиметре. Наше правило тогда запишется в виде: $l(k_1 - k_2) = 1$. Или, другими словами, чем короче волновой пакет мы желаем построить, тем больше будет разница в волновых числах, которые мы должны для этого использовать.

В пустом пространстве все периодические волны, из которых составлен наш волновой пакет, распространяются с одинаковой скоростью, и поэтому весь пакет движется без изменения своей длины или формы. Однако, когда он проходит через преломляющую среду, например через призму, в которой свет различных цветов, т. е. с различными длинами волн, распространяется с разными скоростями, волновой пакет будет расплываться. Пока он движется в пустом пространстве, его поведение ничем не отличается от поведения «световой частицы» в корпускулярной теории, но при движении через систему линз скажется разница в длинах составляющих его волн и это приведет к таким усложнениям, которые не могут быть предсказаны корпускулярной теорией.

До сих пор мы рассматривали волны, ограниченные только в направлении своего распространения. Обобщая наши рассуждения, мы можем построить волновой пакет, имеющий также ограниченную ширину. Как это сделать, видно из рис. 25. Здесь при помощи линий изображено некоторое число периодических волн со слабо отличающи-

мися направлениями. Затемненные участки соответствуют гребням волн, а белые — впадинам. В результате полу-

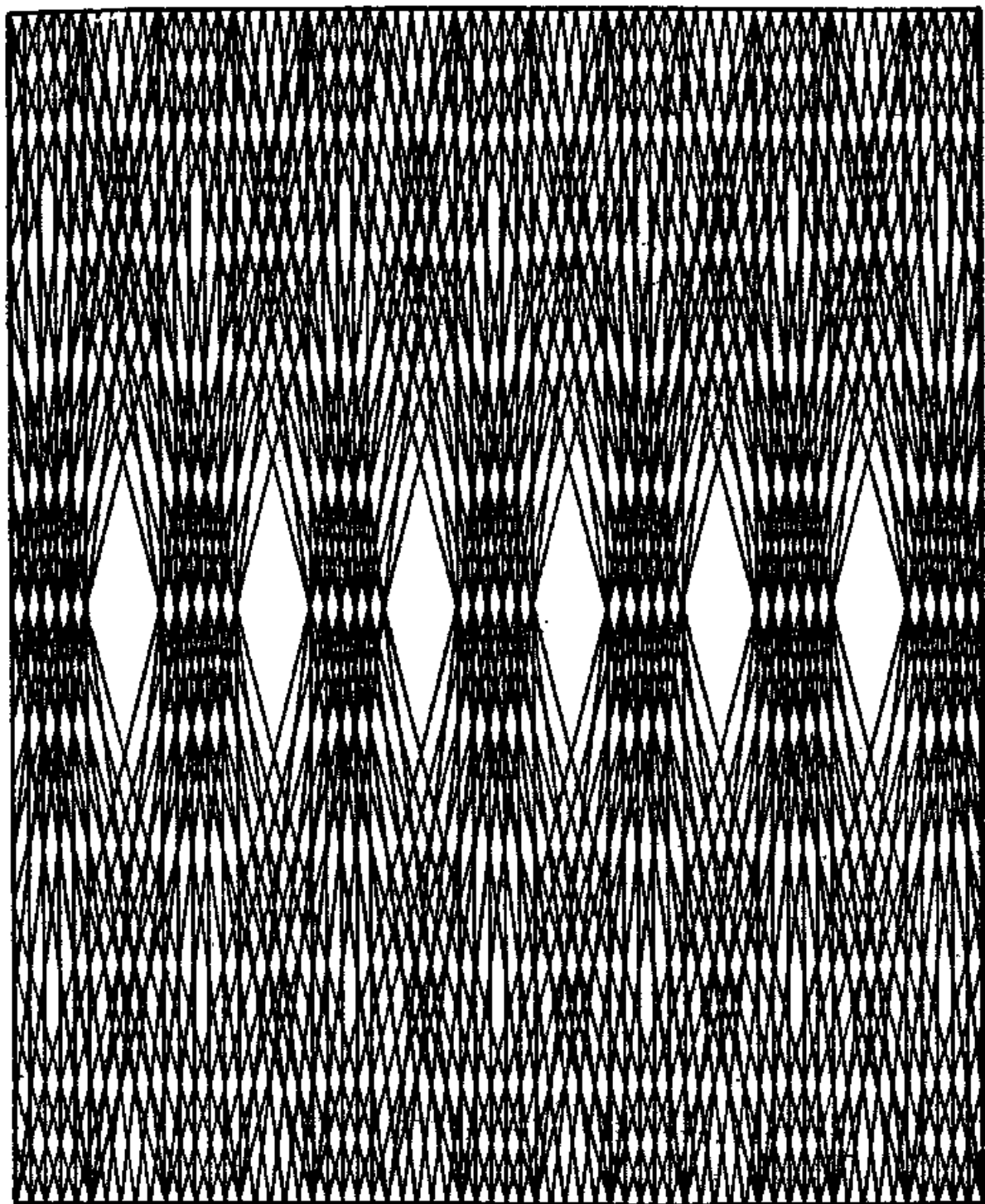


Рис. 25. Волновой пакет конечной ширины.

чился резкий контраст между светлыми и темными областями в середине и равномерно серая окраска по краям. В этой картине было использовано всего пять периодиче-

ских волн, поэтому вверх и вниз от середины снова имеются области большой интенсивности, не попавшие на рисунок. Но если использовать все более и более возрастающее число волн с промежуточными направлениями, все эти области могут быть уничтожены.

Здесь, однако, имеются и некоторые новые черты. В момент времени, изображенный на рисунке, в отдельных областях вдоль средней линии гребни волн точно совпадают. Для этого необходимо, чтобы волны, наиболее наклоненные к средней линии, имели самую короткую длину. Следовательно, частоты волн в нашем пакете различны и по прошествии некоторого времени соответствующие волны сдвинутся на разную величину и уже больше не будут давать такой чистой картины. Мы получим тогда слабые колебания в окраске, расширяющиеся со временем в обе стороны от средней линии. Другими словами, узкий пучок света не будет оставаться узким бесконечно долго, а постепенно расплывется. Расширение останется незаметным, если ширина пучка велика по сравнению с длиной волны, так как в этом случае направления составляющих его волн различаются крайне слабо.

Таким образом, волновая теория ведет к осложнениям, не предвиденным корпускулярной теорией даже при описании явлений, протекающих в пустоте, а не только в призмах или других оптических инструментах. В случае резко ограниченного пучка, например для границы тени от какого-нибудь тела, освещенного строго параллельным светом, волновая теория предсказывает, что на большом расстоянии от тела граница не останется резкой; а размоется вследствие расширения пучка.

Для всех практических целей, т. е. для практически используемых источников света и тел разумных размеров, это искажение тени совершенно несущественно, и поэтому мы можем считать, что ограниченный волновой пакет с неслишком малыми длиной и шириной движется так, как если бы он был частицей.

Область оптики, которая занимается только световыми лучами, т. е. траекториями, вдоль которых движутся такие волновые пакеты, называется геометрической оптикой. Она с успехом используется при построении оптических инструментов, но, конечно, только в тех

случаях, когда несущественны дифракция и интерференция.

Пример геометрической оптики интересен с нашей точки зрения по двум причинам. Во-первых, он показывает, как в процессе познания законов природы мы иногда возвращаемся к более старым представлениям. Однако старые представления оказываются годными лишь приблизительно, в подходящих условиях, и за границей их применимости мы должны использовать существенно новые представления, которые родились из более глубокого проникновения в тайны природы.

Во-вторых, соотношение между бесконечно протяженной периодической волной и волновым пакетом станет для нас крайне важным, когда мы перейдем к обсуждению волновой природы материи.

ГЛАВА 4

АТОМЫ И ЭЛЕКТРОНЫ

Химия и гипотеза об атомах

До сих пор свойства материи фигурировали в нашем обсуждении законов природы лишь случайным образом. В механике мы говорили о телах тяжелых и легких, о веществах мягких, которые легко поддаются давлению, и о твердых, которые сильно сопротивляются изменениям своей формы, говорили о твердых телах, газах и жидкостях. Мы упоминали вещества, проводящие электричество, и другие, которые могут быть намагничены. Нам встречались среды, пропускающие и преломляющие свет, окрашенные тела и металлы, являющиеся зеркалами. Можно было бы заполнить целую главу описанием бесчисленных свойств веществ, как встречающихся в готовом виде в природе, так и искусственно изготовленных.

Мы переходим к части нашего исследования законов природы, задача которой состоит в том, чтобы дать классификацию этих свойств и найти управляющие ими простые закономерности. Значительная доля относящихся сюда вопросов принадлежит к области химии. На протяжении столетий химики выяснили, что все известные нам вещества состоят из более простых, называемых химическими элементами. В природе существуют 92 элемента.

Далеко не все используемые нами вещества являются элементами. Многие из металлических элементов знакомы читателю: алюминий, медь, железо (хотя встречающееся на практике железо сильно загрязнено примесями), олово, серебро, золото, свинец и так далее. Газ водород тоже является элементом; он применяется для наполнения аэростатов и содержится как составная часть в горючих

газах, используемых нами для обогрева и приготовления пищи. Сажа в основном состоит из другого элемента, углерода. Но большинство веществ представляет собой соединения химических элементов или их смеси. Воздух — смесь кислорода и азота, вода — соединение кислорода и водорода, поваренная соль — соединение натрия и хлора, и так далее.

Смеси обычно ведут себя так же, как и их составляющие. Смесь двух газов, кислорода и азота, — снова газ, воздух. Но когда газообразные кислород и водород вступают в соединение, мы получаем жидкость, воду.

Современная химия началась с приложения количественных методов, и прежде всего взвешивания, к исследованию образования соединений.

Таким образом были найдены два правила: во-первых, если известное количество двух элементов, например кислорода и водорода, вступает в соединение, то масса образовавшейся воды будет точно равна сумме масс исходных веществ. Комбинируя, например, 1 г водорода и 8 г кислорода, мы всегда будем получать точно 9 г воды. Это правило известно под названием закона сохранения массы.

Второе правило есть закон постоянства пропорций. Он гласит, что пропорции, в которых элементы вступают между собою в соединение, всегда остаются постоянными. Например, количество кислорода, которое может соединиться с данным количеством водорода, всегда в восемь раз больше последнего. Если мы смешаем 1 г водорода с более чем восемью граммами кислорода и подожжем смесь, весь водород вступит в соединение, а некоторая часть кислорода останется свободной. Если, напротив, в смеси будет меньше восьми граммов кислорода, свободной останется некоторая доля водорода.

Гипотеза атомов родилась из закона постоянных пропорций. Эта гипотеза, которая теперь подтверждена необозримым числом экспериментов, утверждает, что вся материя состоит из атомов и что каждому химическому элементу соответствует свой род атомов, отличающихся друг от друга, в частности, по весу. Для многих целей можно считать, что атомы одного элемента, например кислорода, подобны между собой и имеют одинаковую

массу (справедливость этого утверждения будет доказана позднее).

Такие атомы могут соединяться и образовывать молекулы. Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Это отражается в ее химической формуле H_2O . Из того, что было сказано о пропорции, в которой реагируют кислород и водород, ясно, что масса кислородного атома в шестнадцать раз больше массы водородного.

Таким образом, молекула есть наименьшая часть химического соединения, например воды, которая еще сохраняет все химические свойства воды как таковой. Ее уже нельзя измельчить дальше, не отделив кислорода от водорода и не нарушив тем самым химических свойств.

Вообще говоря, физика во всех своих отраслях, как в тех, с которыми мы познакомились в предыдущих главах, так и в некоторых других, занимается лишь изменениями, не нарушающими целостность молекул. Мы можем подвергнуть воду действию сил, заставив ее течь, пропустить через нее звуковую волну, можем поместить в магнитное поле или осветить, можем вскипятить ее или заморозить, однако строение ее молекул останется при этом неизменным (это уже не всегда справедливо, если мы пропустим через воду электрический ток). Изменения же, при которых атомы отщепляются от молекулы или присоединяются к молекуле, так что образуется новое соединение, принадлежат к области химии.

Мы знаем теперь, что такое разделение оказывается иногда чрезмерным упрощением; в частности, в твердых веществах граница раздела между физикой и химией далеко не так резка. К счастью, различие между ними есть скорее вопрос терминологии, поскольку и физика и химия исходят из тех же основных законов и являются отраслями одной науки о природе, разделенными лишь из практических соображений.

Размышления на тему о том, что произойдет, если разлагать вещество на все более и более мелкие части, были излюбленным времяпровождением философов задолго до того, как атомная гипотеза заняла главенствующее положение в химии. Всегда существовали приверженцы двух различных мнений, одни из которых считали, что материя

бесконечно делима, а другие предполагали, что должны существовать неделимые ее частицы, атомы. Само название «атом», означающее нечто неделимое, возникло из таких рассуждений и по традиции сохранилось до нашего времени, хотя, как мы увидим, нельзя сказать ничего подобного об атомах современной физики.

Однако идея атома не играла существенной роли в развитии наших знаний, пока мы не оказались в состоянии проверить ее истинность, доказать или опровергнуть ее. Это можно сделать, сопоставив следствия из атомной гипотезы с экспериментами, исследовавшими реальное поведение материи. Такие наблюдения могут быть, конечно, и чисто качественными, но наиболее убедительными являются лишь факты, облеченные в количественную форму и полученные при помощи аккуратных измерений. Развитие атомной гипотезы в химии дает превосходный пример того, как точные количественные измерения, в данном случае взвешивание реактивов, указали на закономерности, которые привели к созданию новых представлений, а затем и подтвердили их.

Мы не будем рассматривать здесь доводы, на основании которых заключили, что молекула воды содержит точно один атом кислорода и два атома водорода, другими словами, что ее формула есть H_2O , а, например, не HO (в последнем случае атом кислорода имел бы такую же массу, как восемь водородных атомов). В конечном счете вопрос решается тем, что существуют соединения, в которых один из атомов водорода замещен атомом какого-нибудь другого элемента.

Атомная гипотеза оказалась очень продуктивной и удобной, ибо все без исключения химические соединения могли быть представлены с ее помощью в виде соответствующих формул.

Однако на этой ступени развития науки существование атомов оставалось лишь правдоподобной и полезной гипотезой. Оно не было доказано. Кинетическая теория теплоты, к которой мы еще вернемся, оказала дальнейшую поддержку атомной гипотезе. Но чтобы показать, что атомы есть реальность, нужно было найти способы определить их размеры или массу. Химические данные о пропорциях, в которых они вступают в реакции, давали толь-

ко отношение весов кислорода и водорода, и было совершенно безразлично, припишем ли мы обоим атомам (а следовательно, и молекуле воды) в десять раз больший или в десять раз меньший вес. К концу девятнадцатого столетия, когда наука достигла этого уровня, многие выдающиеся ученые возражали против атомной гипотезы, как необоснованной и поспешной. К ним принадлежал Э. Мах, имевший большие заслуги в обосновании механики и теории относительности.

Мах был несомненно прав, когда подчеркивал, что мы не можем быть уверены в существовании атомов, пока не умеем определять, сколь они велики, и, глядя в прошлое, следует признать, что защитники теории проявили слишком много фантазии как в оценках убедительности тогдашних доказательств в пользу теории, так и в догадках о том, что покажет решающий эксперимент. Нет никакого сомнения, что если бы Мах и другие выдающиеся оппоненты атомной теории дожили до наших дней, то они прежде всего признали бы существование атомов.

Размеры атомов. Ионы

В современной физике известно очень много методов, посредством которых можно взвесить атомы, определить их размеры и сосчитать их число. Многие из них основаны на явлениях из отраслей физики, еще не затронутых нами. Существует, однако, один очень мощный метод, который мы в состоянии изучить уже в настоящей главе, а именно дифракция рентгеновских лучей. Мы уже упоминали, что лучи Рентгена представляют собой электромагнитные волны, подобные свету, но с длиной волны, в несколько тысяч раз меньшей, чем у света. Для наших целей нам нет нужды заниматься вопросом, как получить такие рентгеновские лучи, да и читатели, наверное, в большинстве своем неоднократно видели рентгеновские трубки в лаборатории, больнице или обувном магазине.

Лауэ впервые заметил, что рентгеновские лучи, проходя через твердые вещества, рассеиваются не во всех направлениях, а лишь на некоторые избранные углы. Картина, которая при этом возникает, напоминает в точности

явление дифракции, рассмотренное нами в главе о свете. Поэтому естественно предположить, что атомы в твердом теле располагаются правильным образом на равных расстояниях друг от друга. Тогда отражение рентгеновских лучей от отдельных атомов будет играть такую же роль, как отражение света от различных линий дифракционной решетки. Это предположение оправдывается с очень большой точностью, и, изучая картину дифракции, можно определить расположение атомов, или «кристаллическую решетку». Направления, в которых рассеиваются рентгеновские лучи, зависят, в частности, от соотношения между их длиной волны и расстоянием ближайших атомов друг от друга. Следовательно, при помощи рентгеновских лучей можно выразить межатомные расстояния в твердом теле через длину волны.

Это не решило бы поставленной задачи, если бы мы не умели измерять длину волны. Последнюю можно определить, используя дифракцию рентгеновских лучей на решетке, образованной тонкими линиями, нанесенными на поверхность металла. Конечно, даже самые тонкие линии, которые нам удастся нанести, будут все равно гораздо шире длины волны, но здесь снова мы можем получить интерференционную картину, используя малые углы точно таким же способом, каким мы наблюдали дифракцию света на граммофонной пластинке.

В этом заключается метод определения межатомных расстояний. Используя его, мы найдем, сколько атомов содержится в одном кубическом сантиметре твердого тела, например поваренной соли. И так как мы знаем вес кубического сантиметра, то определим и вес одного атома.

Расстояние между атомами в твердом теле оказывается порядка 10^{-8} см; другими словами, оно в несколько тысяч раз меньше, чем длина волны видимого света. Ясно поэтому, что мы никогда не будем в состоянии увидеть атом непосредственно, какой бы силы микроскоп мы ни построили. Действительно, мы получим ясное изображение предмета в микроскопе только в том случае, если очертания предмета могут быть переданы через оптические системы по законам геометрической оптики, которую мы обсуждали в конце предыдущей главы. Для этого тре-

буется, чтобы его размеры были велики в сравнении с длиной волны, в то время как для атомов справедливо обратное соотношение.

Для веса атома водорода было найдено значение $1,6 \cdot 10^{-24}$ г — число, которое столь мало, что его трудно себе представить. Возможно, следующий пример поможет создать впечатление того, насколько малы атомы. Предположим, что мы откачали воздух из какого-нибудь сосуда при помощи мощного вакуумного насоса. Обычно считают пространство, в котором создан такой «высокий вакуум», почти пустым, если удалось понизить количество воздуха в нем в 10^9 (т. е. в тысячу миллионов) раз. Но даже тогда в каждом кубическом сантиметре будет находиться почти миллион атомов.

Некоторые другие методы определения числа и размеров атомов мы рассмотрим позже. Для нас сейчас важно только одно, именно, что все они дают одинаковые результаты, подтверждая тем самым, что атом уже больше не полезная фикция, а реально измеренный и взвешенный объект.

Чтобы узнать как можно больше об атомах, нужно изучить их внутреннее строение. Исследования в этом направлении начались с работ по прохождению электричества через жидкости и газы. Фарадей изучал электрические токи в некоторых жидкостях, в частности в воде, в которой были растворены какие-нибудь соли, и нашел, что при протекании тока через такой раствор часть веществ, из которых состоит соль, выделялась на металлической пластине, поддерживаемой при положительном потенциале, а другая часть — на отрицательной пластине.

Этот процесс, известный под названием электролиза, используется в гальванопластике; он тесно связан также и с тем, что происходит во время зарядки автомобильного аккумулятора или батареи.

Далее было обнаружено, что количество вещества, откладывающегося на пластинах, находится в прямой зависимости от величины заряда, прошедшего через жидкость.

В свете атомной теории эти закономерности объясняются тем, что каждый атом соли стремится присоединить себе определенный электрический заряд, положительный или отрицательный. Например, поваренная соль представ-

ляет собой соединение натрия (химический символ Na) и хлора (химический символ Cl) и содержит одинаковое число атомов каждого; ее химическая формула — NaCl. При растворении в воде некоторые молекулы NaCl распадаются на хлор и натрий таким образом, что натрий несет при этом положительный заряд определенной величины, а хлор — равный отрицательный заряд. Заряженные атомы называются ионами. Если между металлическими пластинами, опущенными в раствор, приложить электрическое поле, ион натрия притянется к отрицательной пластине, а ион хлора — к положительной. Достигнув пластин, ионы нейтрализуются, т. е. теряют свой заряд. Нейтральные атомы хлора или натрия будут оставаться в некоторой комбинации с водой.

Ясно, что если каждый атом натрия всегда несет заряд одной и той же величины, то полный заряд, который переходит с одной пластины на другую, будет находиться в определенном отношении к количеству натрия, выделившемуся из раствора.

Таким образом, мы можем определить, какой заряд соответствует одному грамму натрия. Так как мы знаем теперь вес атома натрия, мы найдем, какой заряд переносит ион натрия при протекании тока через раствор. Оказывается, что заряды, переносимые ионами хлора и натрия, равны и противоположны по знаку и что точно такое количество заряда появляется во всех других солях и всех других электролитических процессах.

Некоторые ионы несут заряд по сравнению с основным двукратный, трехкратный и даже еще большей кратности.

Эти результаты наводят на мысль, что электричество также имеет атомную структуру и, следовательно, существует наименьший электрический заряд.

К подобным заключениям можно придти, изучая прохождение электричества через газы, например в разрядных трубках, с которыми мы теперь хорошо знакомы благодаря световым рекламам и люминесцентному освещению. Здесь мы снова найдем ионы, переносящие электрический заряд. Наиболее благоприятным является случай разрядных трубок низкого давления, где механическая задача о движении таких ионов очень проста. В жидко-

стях ион окружен со всех сторон другими ионами и его движение сильно напоминает движение человека в тесной толпе. В трубке низкого давления ион может долгое время двигаться, не встречаясь с другими ионами или атомами. Поэтому оказывается возможным наблюдать его отклонение под действием приложенного электрического поля. Если мы знаем скорость такого иона, отклонение покажет нам, насколько он ускорился, и, следовательно, даст значение силы, деленной на массу, или, так как напряженность электрического поля известна, величину $\frac{e}{m}$, т. е. электрический заряд, деленный на массу.

В действительности мы не знаем скорости ионов, но ее можно определить, прилагая, кроме электрического, еще и магнитное поле, поместив, например, разрядную трубку между полюсами магнита известной силы. Движущийся заряд представляет собой электрический ток, а, как мы видели во второй главе, в магнитном поле на ток действуют силы тем большие, чем он сильнее. Следовательно, на движущуюся в магнитном поле заряженную частицу действует сила, направленная под прямым углом к направлению движения; величина этой силы возрастает вместе с увеличением скорости частицы.

Электрон

Такова в грубых чертах идея принадлежащего Дж. Дж. Томсону метода измерения $\frac{e}{m}$ для различных ионов в газовом разряде. Оказалось, что для очень многих положительно и отрицательно заряженных ионов в газе отношение заряда к массе совпадает со значением, найденным из опытов с электролитами. Однако (и это сразу бросалось в глаза) в трубке попадались частицы, заряженные всегда отрицательно, которые были почти в две тысячи раз легче, чем самый легкий из атомов, атом водорода. Их называли электронами. Пучки быстрых электронов в разрядной трубке называют катодными лучами, потому что они испускаются катодом, т. е. той из двух металлических пластин, которая поддерживается при отрицательном потенциале.

Как показали дальнейшие исследования, в газе, содержащем вначале только электрически нейтральные атомы, можно создать электроны и положительные ионы. Следовательно, электроны находятся в самом атоме; теряя электрон, атом приобретает положительный заряд и становится положительным ионом. Подобным же образом, отрицательный ион образуется, когда электрон присоединяется к нейтральному атому. Поэтому заряд ионов всегда или равен по величине заряду электрона (но может быть любого знака), или является его целым кратным, если атом теряет или присоединяет к себе два или более электронов.

Сравнительно просто измерить заряд электрона (его обычно обозначают буквой e). Наиболее изящный способ был предложен Милликеном. Он наблюдал в горизонтально расположенный микроскоп мельчайшие капельки масла, взвешенные в воздухе. Такие капельки падают под действием собственного веса, но благодаря малости своих размеров — крайне медленно. Это происходит потому, что вес капли пропорционален ее объему, т. е. кубу диаметра, в то время как сила сопротивления воздуха меняется пропорционально поперечному сечению, или как квадрат диаметра. Поэтому для очень маленьких капель влияние сопротивления воздуха гораздо заметнее, чем для больших. В приборе Милликена масляные капли находились в пространстве между двумя металлическими пластинами, которые заряжались подобно пластинам конденсатора. Некоторые капли оказывались при этом заряженными и под действием электрического поля начинали падать с большей или с меньшей, чем до этого, скоростью или даже поднимались вверх в зависимости от величины и знака своего заряда. Поэтому, наблюдая в микроскоп движение какой-нибудь одной капли в электрическом поле и без него, можно было найти действующую на нее электрическую силу и, тем самым, поскольку напряженность известна, величину ее заряда.

Определенные таким способом заряды капель всегда были точно равны целому кратному некоторого наименьшего. Последний и интерпретировали как заряд электрона, так как зарядиться капля могла, лишь теряя электрон или захватывая его извне. Электронный заряд оказался

крайне малым, приблизительно $5 \cdot 10^{-10}$ в единицах, использовавшихся в главе 2. На более привычном языке это означает, что ток силой в один ампер переносит $6 \cdot 10^{18}$ электронов в секунду.

Знание заряда электрона дает возможность определить массу атома другим способом. Как мы видели при изучении прохождения электричества через жидкости, отношение количества отложившегося на пластинах вещества к величине протекавшего при этом заряда постоянно и зависит от $\frac{e}{m}$, где e — заряд иона, а m — его масса.

Поскольку простейший ион несет только один электронный заряд, можно, зная заряд, найти и массу иона.

Открытие электрона в конце девятнадцатого столетия явилось исходной точкой для изучения строения атома, ибо электрон, очевидно, является одной из его составных частей.

Как устроен атом?

Потребовалось довольно много времени, чтобы проникнуть внутрь атома и выяснить, какую роль в нем играет электрон. Следующий шаг вперед был сделан в работах Резерфорда по изучению радиоактивности. Чтобы лучше разобраться в полученных им результатах, мы скажем несколько слов об этом явлении. Со времени работ Беккереля было известно, что некоторые минералы, в частности так называемая урановая смолка, испускают лучи с очень большой проникающей способностью. Их можно было обнаружить по почернению фотографических пластинок, а также по тому, что под их действием воздух приобретал способность проводить электричество. Мария и Пьер Кюри выделили из урановой смолки элемент радий, оказавшийся особенно мощным источником такого излучения. Ими же были открыты и некоторые другие радиоактивные вещества.

Резерфорд подробно исследовал природу излучения, испускаемого этими веществами. Его можно было разделить на три основных типа, которые Резерфорд назвал, используя первые три буквы греческого алфавита, альфа-, бета- и гамма-лучами. Он показал, что альфа-лучи

отклоняются в электрических и магнитных полях точно таким же образом, как пучки положительно заряженных частиц; бета-лучи вели себя подобно отрицательно заряженным частицам, на гамма-лучи электрические и магнитные поля совсем не действовали.

Оказалось, что гамма-лучи состоят из электромагнитных волн, гораздо более коротких, чем рентгеновские лучи. Бета-лучи состоят из электронов, а альфа-лучи — из положительно заряженных тяжелых частиц. Как показали измерения отклонения альфа-частиц в полях, отношение их заряда к массе было точно таким же, как у ионов газа гелия, наиболее легкого элемента после водорода. Мы знаем теперь, что альфа-частицы действительно представляют собой ионы гелия. Они выходят из радия или других радиоактивных веществ с очень большими скоростями, достигающими иногда $\frac{1}{10}$ скорости света, и обладают способностью проникать сквозь тонкие слои из различных материалов, например сквозь стопу бумаги или алюминиевую фольгу. Позднее мы вернемся к вопросу о происхождении этих частиц.

Резерфорд заинтересовался тем, как сильно альфа-частицы отклоняются от прямого пути при прохождении через вещество. Для этого он направил узкий пучок частиц на тонкую фольгу. Довольно неожиданно оказалось, что большинство частиц вообще не претерпело заметного отклонения и продолжало двигаться по прямой линии. Только немногие из них изменили свое направление и уже совсем малое число их отклонилось на большие углы.

Этот результат был настоящим сюрпризом. Мы знаем, что твердые тела состоят из тесно примыкающих друг к другу атомов, поскольку даже при помощи очень больших давлений не удастся заметно изменить их размеры. Поэтому резерфордовские альфа-частицы должны были, проходя через такое большое число атомов, испытывать столкновения с некоторыми из них и отклоняться от своего прямого пути. Вероятно, бильярдный игрок был бы удивлен несколько не меньше, если бы на бильярде, совершенно заполненном шарами, пущенный им шар прошел от одного борта до другого и вышел, не изменив направления. Действительно, это было бы возможно только в том

случае, если бы между шарами имелось достаточно места для прохода.

Тогда Резерфорд заключил, что атом почти пуст, а его составные части и альфа-частицы, которые он использовал в роли бильярдного шара, должны быть очень малы в сравнении с размерами атома.

Он смог сказать и еще больше. Те немногие альфа-частицы, которые были рассеяны, очевидно, смогли близко подойти к каким-то частям атома, где на них действовали сравнительно большие силы. Так как альфа-частицы сами по себе заряжены, естественно было думать, что за их отклонение ответственны электрические силы.

Путем блестящего по простоте анализа Резерфорд доказал, что число альфа-частиц, отклонившихся в направлении какого-нибудь угла, совпадает с тем его значением, которое можно было бы ожидать, если бы каждый атом содержал сконцентрированный в очень малой области заряд, действующий на альфа-частицу с силой, следующей закону обратных квадратов. Такой заряд должен быть связан с массой, превышающей массу альфа-частицы, так как, с другой стороны, он отклоняет ее, не смещаясь сколько-нибудь заметно сам.

Опыты Резерфорда подсказывали следующую картину атома. В центре атома находится маленькое положительно заряженное ядро, окруженное электронами. Число электронов таково, что атом в целом нейтрален. В этом случае электроны движутся под действием силы притяжения, обратно пропорциональной квадрату расстояния от ядра, подобно планетам в поле притяжения Солнца, и атом Резерфорда выглядит как солнечная система в миниатюре. Атом действительно так же пуст, как и солнечная система; атомное ядро мало в сравнении с размерами атома, подобно тому как Солнце мало по сравнению с орбитами планет.

Поэтому масса ядра близка к массе целого атома; даже легчайшее из ядер почти в две тысячи раз тяжелее электрона.

Так как обычно атом в целом не имеет заряда, электрический заряд ядра должен полностью компенсироваться зарядом электронов. Если заряд ядра есть $+Ze$, где e — снова заряд электрона, а Z — целое число, то в атоме,

чтобы его скомпенсировать, должны находиться Z отрицательных электронов.

Число Z связано прежде всего с некоторыми удивительными закономерностями, открытыми в химии. Менделеев нашел, что если выписать все известные химические элементы в порядке возрастания их веса (определяемого из пропорций, в которых они вступают в реакцию), в их ряду обнаружится периодическое повторение типичных химических свойств.

Например, таблица будет содержать в определенных местах «благородные» (инертные) газы: гелий, неон, аргон и другие, которые остаются газообразными вплоть до весьма низких температур и совсем не соединяются с другими элементами.

Далее, за благородными газами всегда следуют щелочные металлы, т. е. за гелием стоит литий, за неоном — натрий, за аргонном — калий и т. д. Все эти металлы являются химически наиболее активными и вступают в реакцию даже с водой; они образуют соли и в растворах легко переходят в положительные ионы, т. е. легко теряют электрон.

С другой стороны, все элементы, предшествующие инертным газам (за исключением первого), принадлежат к одной химической группе, называемой галогенами. Сюда относятся фтор, хлор, бром и другие элементы, которые, соединяясь с водородом, дают кислоты и в растворах образуют отрицательные ионы, т. е. охотно присоединяют дополнительный электрон. Эти закономерности привели Менделеева к построению периодической системы элементов.

Оказалось, что число Z , равное заряду ядра в единицах электронного заряда, точно совпадает с порядковым номером элемента в менделеевской таблице.

Таким образом, легчайший элемент водород, с $Z=1$, содержит положительное ядро и один электрон с равным отрицательным зарядом. Ядро атома второго элемента, гелия, имеет вдвое больший заряд и, когда атом нейтрален, он содержит два электрона. Таблица продолжается до тяжелейшего элемента, известного в природе, урана; с $Z=92$; его ядро несет в 92 раза больший, чем у ядра водорода, заряд и окружено 92 электронами.

Почему электроны не падают на ядро?

Попытаемся теперь на базе этой картины понять свойства атома. Возьмем простейший случай — атом водорода. Он состоит из водородного ядра, или протона, и одного электрона. Они притягиваются друг к другу по закону обратных квадратов, и поэтому механическая задача определения их движения совпадает с таковой для Солнца и одной планеты. Мы могли бы, следовательно, ожидать, что электрон будет вращаться вокруг протона. До тех пор, пока нет возмущающих влияний, это состояние будет устойчивым и форма и размеры кривой, описываемой электроном, — его орбита, останутся неизменными, точно так же как орбита планеты остается той же самой в отсутствии возмущений.

Однако в случае атома мы имеем не мало оснований считать, что такие возмущения на самом деле есть. Особенно важны два влияния. Во-первых, влияние других атомов, особенно в жидкостях и твердых телах, где атомы расположены очень тесно. Силы, действующие между соседними атомами, будут представлять тогда сильное возмущение и электрон уже не сможет больше оставаться на идеальной устойчивой орбите. Каждый электрон будет постепенно все больше и больше сближаться со своим протоном, так что благодаря силам притяжения будет освобождаться все большее и большее количество энергии. В то же время уменьшаются размеры электронной орбиты, а вместе с нею и размеры атома, что приведет к полному развалу жидкого или твердого вещества. Конечно, все это совершенно не похоже на поведение реальных веществ и, следовательно, в нашей картине имеется какой-то серьезный порок.

Но даже если бы мы имели дело только с отдельным атомом, как это можно считать в случае газа, где атомы наибольшее время находятся достаточно далеко друг от друга, все равно оставалась бы другая причина, возмущающая простое движение электронов, а именно — излучение света или других электромагнитных волн. Электрон, т. е. заряженная частица, вращаясь по орбите, создает колеблющееся электрическое поле, что и приводит к излучению электромагнитных волн, как и в случае

простой антенны, который мы разбирали в главе 2 (рис. 17). Излучение уносит энергию, и по закону сохранения отсюда следует, что механическая энергия электрона должна все время уменьшаться, а следовательно, орбита электрона будет постепенно сжиматься до тех пор, пока электрон не «упадет» на ядро. Это рассуждение снова показывает, что законы природы, с которыми мы до сих пор познакомились, не в состоянии объяснить существования атомов определенных размеров и с не меняющимися со временем свойствами.

Оба наших рассуждения представляют собой пример тех трудностей, с которыми мы встретились при попытке объяснить строение атома в рамках законов «классической» физики, т. е. механических законов Ньютона и электродинамических законов Максвелла. В следующих главах мы увидим, что эта и другие трудности потребовали далеко идущего пересмотра основных законов, приведшего скорее не к изменению этих законов, а к их уточнению, которое является предметом квантовой теории.

Многие факты можно понять

Однако, несмотря на эти противоречия, многие черты поведения материи можно правильно истолковать при помощи понятия атома даже на той ступени неполного знания законов природы, которой мы пока достигли. Например, если атом, содержащий, как мы видели, положительное и отрицательное электричество, помещен в электрическое поле, то оно притянет положительный заряд в одну сторону, а отрицательный в другую, и тем самым сдвинет их друг относительно друга. Используя картину атома, в котором электроны вращаются по орбитам вокруг положительного ядра, мы можем сказать, что орбиты сдвинутся таким образом, что электроны уже не будут распределены равномерно вокруг ядер. Когда мы имеем дело не с отдельным атомом, а с твердым веществом, содержащим очень большое их число, все сказанное выше применимо к каждому из атомов. В результате все положительные заряды в теле сместятся в одном направлении, а отрицательные — на ту же величину в противоположном. Но так как внутри тела в каждом малом объеме содержится равное

число положительных и отрицательных зарядов, их смещение не изменит их плотности внутри этого объема. Этого уже нельзя сказать о зарядах, расположенных вблизи поверхности, и в результате на одной стороне образуется слой положительных зарядов, а на другой — слой отрицательных.

На рис. 26, а изображена плитка такого вещества, содержащего положительные и отрицательные заряды.

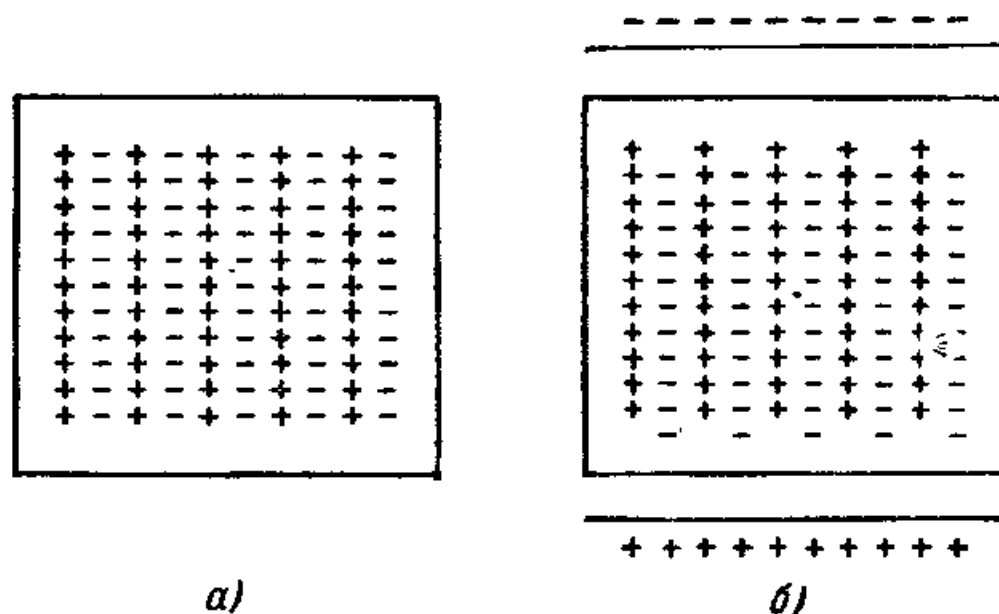


Рис. 26. а — вещество, содержащее положительные и отрицательные заряды; б — смещение зарядов во внешнем поле.

На рис. 26, б эта плитка помещена между двумя металлическими пластинами, заряженными положительно и отрицательно, как в конденсаторе, обсуждавшемся в связи с рис. 11. Все положительные заряды при этом сдвинулись вверх, а отрицательные — вниз, и в результате образовался избыток положительного заряда на одном конце и отрицательного на другом. Слой индуцированного заряда создает электрическое поле, которое противодействует полю, созданному пластинами. Следовательно, поле между пластинами конденсатора уменьшится, если щель между ними наполнить подходящим непроводящим веществом. Это означает в свою очередь, что при данном заряде на пластинах уменьшится разность потенциалов, или, если разность потенциалов поддерживать постоянной, увеличится их заряд. Мы говорим тогда, что возросла емкость конденсатора. Стремление вещества противодей-

ствовать таким способом внешнему полю связано с его диэлектрической постоянной. Формулируя в главе 2 законы электромагнитного поля, я не касался диэлектрической постоянной, хотя на практике она важна для определения полей внутри твердых тел или вблизи них, поскольку такие явления не затрагивают основных законов, а только отражают строение вещества и действие поля на содержащиеся в нем атомы.

Точно так же можно убедиться, что магнитное поле должно оказывать влияние на движение электронов, хотя точно определить, как оно изменяет их орбиты, уже далеко не так просто.

Тот факт, что некоторые вещества проводят электричество, станет понятным, если мы предположим, что в них электроны могут существовать отдельно от атомов и свободно передвигаться внутри тела. Наше предположение подтверждается тем, что проводниками обычно бывают элементы, которые химики знают как электроположительные, т. е. которые легко образуют положительные ионы, теряя один или несколько электронов. Кроме того, как было прямо доказано, ток в металлах осуществляется, как правило, посредством движения отрицательных зарядов и величина массы этих зарядов скорее соответствует массе электронов, чем атомов.

Кроме этих электрических и магнитных проблем, понятие атома позволяет бросить свет также на строение и обычные механические свойства материи, но поскольку последние всегда зависят от температуры, мы не сможем говорить о них прежде, чем наметим основные идеи, связывающие теплоту и движение атомов.

ГЛАВА 5

ХАОТИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ АТОМОВ. ТЕПЛО КАК БЕСПОРЯДОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Количество тепла. Тепло и беспорядок

В этой главе рассказывается о теплоте, т. е. о той отрасли физики, которая в отличие от электричества имеет дело с процессами, доступными непосредственно нашим чувствам и знакомыми нам из повседневной жизни.

Двумя основными понятиями в теории теплоты являются количество тепла и температура. Каждый читатель, конечно, знает, что такое температура, ибо он не один раз имел повод посмотреть на показания термометра и не раз ощущал неудобство, вызванное слишком высокой или слишком низкой температурой. Понятие количества тепла гораздо менее привычно.

Когда какое-нибудь тело, например кастрюля с водой, нагрелось, иначе говоря, повысилась его температура, мы говорим, что оно содержит большее количество тепла. Однако различные тела, нагретые до одной температуры, содержат не одинаковое его количество. Если два чайника налиты водой до разных уровней, то, чтобы вскипятить более полный из них, требуется большая затрата тепла. Теплота измеряется в калориях. Калория есть количество тепла, необходимое, чтобы нагреть один грамм воды на один градус Цельсия. Существуют и другие единицы. Например, британская тепловая единица, или БТЕ, есть количество тепла, необходимое для нагревания одного фунта воды на один градус Фаренгейта.

Если вместо воды взять какое-нибудь другое вещество, например свинец, то для нагревания его на один градус потребуется другое (в случае свинца — меньшее) количе-

ство тепла. Это можно продемонстрировать при помощи следующего опыта. Возьмем два сосуда, содержащие одинаковые количества холодной воды. В первый из них нальем еще килограмм воды, нагретой до точки кипения, и будем размешивать смесь, пока в ней не установится однородная температура. В другой сосуд мы опустим килограмм свинца, нагретого предварительно до температуры кипения воды, и подождем, пока температура воды и свинца не сравняется. Если мы измерим теперь температуру в обоих сосудах, то окажется, что первый теплее, чем второй, а значит, вода приносит с собой больше тепла, чем свинец. Мы говорим в таком случае, что свинец имеет меньшую теплоемкость, чем вода.

Имея определенное таким образом количества тепла, мы можем связать его с тем отмеченным в главе I фактом, что теплота есть форма энергии. Когда мы, нажав на педаль тормоза, останавливаем автомобиль, его тормозные барабаны нагреваются. Измерив это увеличение температуры и учтя вес металла в тормозных барабанах и его теплоемкость, мы сможем найти количество выделившегося тепла. (Наш расчет, конечно, будет справедлив, только если можно пренебречь охлаждением тормозов окружающим воздухом и их контактом с другими частями автомобиля.) Если мы сравним это тепло с величиной кинетической энергии, потерянной автомобилем, окажется, что оно точно пропорционально убыли механической энергии. Поэтому мы имеем право сказать, что механическая энергия преобразовалась в тепловую.

Как мы уже подчеркивали, механическую, электрическую, магнитную, химическую и тепловую энергии можно перевести друг в друга многими различными способами. Однако теплота отличается от других видов энергии «необратимым» характером процессов, в которых она участвует. Легко, например, превратить механическую энергию в тепло, но далеко не просто сделать обратное. Сколько бы мы ни нагревали тормозные барабаны, мы не приведем этим автомобиль в движение. Легко превратить электричество в теплоту, заставив ток течь через сопротивление, но очень трудно прямо преобразовать тепло в ток, ибо, повышая температуру проволоки, мы не вызовем движения зарядов. Правда, как мы знаем существуют термо-

пары, т. е. комбинации различных металлов, которые при нагревании создают разность потенциалов, но это очень малый эффект. Можно довольно просто перевести в тепло химическую энергию, сжигая уголь, иначе говоря, соединяя углерод и кислород в двуокись углерода, но разделить ее обратно на кислород и углерод очень трудно.

Это совершенно не похоже на преобразование электричества в механическую энергию, поскольку мы видели, что электрический мотор может быть также использован как генератор. Это не похоже и на преобразование химической энергии в электрическую в аккумуляторе, так как, заряжая его, мы снова переводим электрическую энергию в химическую.

Мы сталкиваемся с тем же родом необратимости в процессах передачи тепла, или теплопроводности. Если два тела, одно горячее, а другое холодное, привести в контакт друг с другом, тепло будет перетекать от более горячего к более холодному до тех пор, пока их температуры не сравняются. Существуют хорошие и плохие проводники тепла, отличающиеся между собой по скорости, с которой выравнивается в них температура. Большинство хороших проводников являются металлами (чем объясняется, что металлы всегда холоднее на ощупь, ибо они отнимают от нашей руки больше тепла). Процесс теплопередачи нельзя обратить, поскольку тепло перетекает всегда от более горячего к более холодному и никогда в обратную сторону. Как только температуры двух соприкасающихся тел сравняются, мы уже не сможем снова сделать их различными, пока не подведем тепло извне к первому телу или не отнимем его от второго.

По этой причине знание полной энергии (включая и тепловую), содержащейся в каком-нибудь теле или в части машины, еще ничего не говорит нам о том, насколько полезна эта энергия на практике. Например, если имеется большое тело, нагретое до температуры значительно выше точки кипения воды, и другое холодное тело, то у меня в руках источник полезной энергии. В самом деле, я могу использовать тепло, содержащееся в горячем теле, поливая его водой и превращая тем самым ее в пар. Пар приведет в действие паровую машину, а затем, по выходе из нее, пар можно сконденсировать на холодном

теле и снова употребить в дело. Но с другой стороны, если я допущу, чтобы температуры горячего и холодного тел в конце концов сравнялись (первое охлаждается, превращая воду в пар, а второе нагревается, когда пар на нем конденсируется в воду), то содержащаяся в них энергия станет уже для нас бесполезной. Мы обычно привыкли думать, что для того, чтобы образовать пар и привести в действие паровую машину, достаточно лишь подводить тепло к ее котлу, но при этом мы считаем само собой разумеющимся, что где-то вне машины имеется источник воды обычной температуры; однако эта разность температур всегда существенна. Если бы мы жили на планете, которая настолько горяча, что вся вода обратилась в пар, мы уже не смогли бы превратить содержащееся в паре тепло в механическую энергию посредством паровой машины или еще каким-нибудь способом.

Чтобы учесть это обстоятельство, ввели, помимо энергии, другую величину, называемую свободной энергией. Ею измеряется как раз та часть полной энергии тела, или нескольких тел, которую можно преобразовать в другие полезные формы энергии. Механическая, электрическая и магнитная энергии всегда целиком входят в свободную энергию, но она включает в себя только часть тепловой энергии. В нашем примере с горячим и холодным телом свободная энергия, очевидно, больше, когда температуры этих тел различны, чем когда они равны. Когда тепло переходит путем теплопроводности от горячего тела к холодному, первое теряет столько же тепла, сколько приобретает второе, но, так как при этом свободная энергия уменьшается, то горячее тело должно потерять больше свободной энергии, чем ее приобретет второе. Поэтому разность между полной и свободной энергиями определяет количество тепла, скрытого в практически бесполезной форме. Эта величина тесно связана с тем, что называют энтропией. Для наших целей нет необходимости точно выяснять, что такое энтропия или как ее измерить, важно только подчеркнуть ее тесную связь с разностью между полной и свободной энергиями.

Когда мы теряем свободную энергию, не используя ее для каких-нибудь практических целей, как в случае теплопроводности или в процессе торможения движущегося

тела трением, разность между двумя видами энергии, а с нею и энтропия, возрастает. В общем случае справедливо следующее утверждение: при всяком изменении, имеющем место в системе тел, которые не подвержены каким-либо внешним воздействиям, энтропия может только возрасти. Процессы, в которых энтропия не меняется, обратимы, и мы обычно можем заставить их протекать в обратном направлении. Процессы же, сопровождающиеся увеличением энтропии, обратить нельзя.

Утверждение о возрастании энтропии представляет собой так называемый второй закон термодинамики, т. е. учения о теплоте. Первый закон есть просто закон сохранения энергии, включая и тепловую, с которым мы уже сталкивались.

Энтропия сродни беспорядку. Положение, при котором легко уравнивать температуры, но трудно потом снова сделать их разными, напоминает то обстоятельство, что просто превратить порядок в беспорядок, но не легко обратит этот процесс. Легко, например, стасовать колоду карт, но гораздо более хлопотно уложить их в старой последовательности. Легко нарушить порядок, при котором сахар лежит в одной банке, а соль в другой, смешав их вместе, но практически невозможно вернуться от этого беспорядочного состояния к упорядоченному. Невозможность сделать яйцо из яичницы является известной метафорой. Тасуя карты, смешивая сахар с солью, разбивая яйцо для яичницы, мы тем самым увеличиваем энтропию. Дальше мы увидим, что энтропия и беспорядок не только похожи, а просто есть одно и то же.

Теплота и движение атомов

Возникает вопрос, не содержит ли в себе тепло чего-нибудь нового, что мы должны были бы включить в сформулированные нами законы природы? Можно ли объяснить теплоту при помощи уже известных нам законов? Оказывается, все относящиеся сюда явления полностью объясняются свойствами атомов и их движением. Такая кинетическая теория тепла, или, как ее иначе называют, статистическая механика, была завершена в течение 19-го столетия.

Мы уже видели в предыдущей главе, что материя состоит из атомов, которые могут существовать отдельно один от другого или объединяться в молекулы. Из молекул состоит большинство известных газов. Например, в воздухе содержатся молекулы кислорода и азота, образованные каждая из пары соответствующих атомов. В чем же тогда заключено различие между холодным и горячим воздухом? Ответ на этот вопрос дает кинетическая теория тепла. Именно, в горячей газе молекулы движутся с большей скоростью, чем в холодном.

Если бы нам удалось посмотреть в микроскоп, гораздо более мощный, чем существующие в действительности, на малый участок пространства, заполненного воздухом, перед нашими глазами предстало бы огромное число молекул, мечущихся самым беспорядочным образом, подобно стае потревоженных муравьев. Однако, в то время как муравьи могут избежать столкновения друг с другом, молекула движется, согласно законам механики, с постоянной скоростью по прямой линии до тех пор, пока не столкнется с другой молекулой или со стенкой сосуда, в который заключен воздух. При нормальном давлении в воздухе остается еще достаточно свободного пространства, не занятого молекулами. Оценив при помощи методов предыдущей главы размеры и вес молекул, мы найдем, что они удалены друг от друга на расстояние приблизительно десяти своих диаметров и что каждая молекула проходит путь, равный тысяче диаметров, прежде чем столкнуться. При таком столкновении, которое мы будем считать упругим в смысле главы 1, обе соударяющиеся молекулы меняют направления, а в общем случае и величины своих скоростей, однако их суммарная энергия при этом не меняется.

Траектория отдельной молекулы оказывается чрезвычайно сложной. Молекула проходит по прямой линии лишь очень короткие расстояния, в среднем порядка нескольких десятитысячных сантиметра. Затем она сталкивается с другой молекулой, ее скорость и направление как-то меняются, снова движется по прямой, снова сталкивается, и так далее. В принципе, если бы мы могли, пользуясь нашим воображаемым микроскопом, определить точные положения и скорости всех молекул, мы узнали бы, какие

из них и где должны столкнуться и каким будет их движение после соударения. Однако ввиду гигантского числа молекул, с которыми нам фактически пришлось бы иметь дело, задача становится совершенно безнадежной, даже если мы обладаем достаточно точными инструментами для измерений. Но как раз благодаря тому, что число это столь велико, нам нет никакой необходимости следить за судьбой отдельной молекулы. Для объяснения физических свойств воздуха достаточно только знать, что происходит со всеми ними в среднем.

Например, одной из важных величин, определяющих поведение газов, является давление. Любой газ, заключенный в сосуд, давит на стенки, препятствующие его дальнейшему расширению. В обычных условиях давление воздуха на стенку не заметно, потому что такой же воздух находится и вне сосуда и давит с той же силой в противоположном направлении. Однако, когда с одной стороны стенки имеется пустое пространство, откуда воздух был удален при помощи вакуумного насоса, возникает односторонняя сила, которая в состоянии сломать стенку, если она недостаточно крепка. Как хорошо известно, эта сила для атмосферного воздуха составляет один килограмм на каждый квадратный сантиметр поверхности стенки.

В молекулярной картине это давление объясняется тем, что стенка непрерывно бомбардируется молекулами. После столкновения молекула отскакивает от стенки, а следовательно, при этом меняется ее скорость. Поэтому согласно законам Ньютона должна существовать сила, действующая на нее, когда она входит в соприкосновение со стенкой, и по закону действия и противодействия равная и противоположная сила должна давить на стенку. Величину силы можно рассчитать, если известно, сколько молекул ударяется о стенку в единицу времени и какова их скорость. Если мы увеличиваем скорость молекул, возрастает сила, действующая на них во время столкновения, а также и само число ударов, так как молекулы будут чаще встречаться со стенкой. Поэтому давление пропорционально квадрату скорости молекул. Оно также зависит от их массы, ибо чем тяжелее молекула, тем большая сила требуется для изменения ее движения. Далее мы знаем, что при неизменной массе газа давление увеличивается с

температурой, или, что то же самое, растет стремление газа расширить занимаемый им объем. Действительно, если мы заткнем пробкой «пустую», т. е. наполненную воздухом, бутылку и начнем нагревать ее, настанет момент, когда давление воздуха изнутри на пробку превзойдет давление снаружи и вытолкнет ее из бутылки. Итак, с повышением температуры скорости молекул возрастают.

Это утверждение можно выразить количественно. Согласно хорошо известному закону Гей-Люссака давление определенного количества газа, находящегося в заданном объеме при температуре t градусов Цельсия, есть $p = p_0 \left(1 + \frac{t}{T_0}\right)$, где p_0 — давление той же массы газа при нуле градусов Цельсия, T_0 — постоянная, равная приблизительно 273 градусам. Если поэтому охладить газ до температуры на T_0 градусов ниже точки замерзания воды, так что t будет равно — 273, давление в нем пропадет совсем. Фактически при сильном охлаждении обычный воздух превратится в жидкость еще задолго до того, как будет достигнута эта точка. Однако если начинать не с обычного атмосферного воздуха, а предварительно понизить давление в нем вакуумным насосом, уменьшив тем самым p_0 , мы сможем достигнуть значительно более низких температур и, в принципе, очень близко подойти к состоянию без давления. T_0 есть тогда, согласно нашим рассуждениям, температура, при которой молекулы остановятся. Эта точка обычно называется абсолютным нулем температуры. Удобно ввести новую температурную шкалу, называемую абсолютной, использующую такое же деление на градусы, как в шкале Цельсия, но с отсчетом от абсолютного нуля вместо точки замерзания воды. Абсолютная температура $T = t + T_0$, где t отсчитывается от нуля Цельсия.

Выраженный через абсолютную температуру закон Гей-Люссака примет вид: $p = p_0 \frac{T}{T_0}$, или давление пропорционально абсолютной температуре. Поскольку мы видели, что для данной массы газа давление пропорционально кинетической энергии его молекул, мы заключаем, что последняя пропорциональна абсолютной температуре.

До сих пор, пока мы просто применяли экспериментальное соотношение между температурой и давлением для

того, чтобы сопоставить температуру и скорость движения молекул, мы не имели возможности доказать, правильна или не правильна кинетическая теория. Такая возможность представляется, если мы сравним различные газы. Как известно, при постоянном давлении масса газа, заключенного в данном объеме, пропорциональна его молекулярному весу. Например, при одинаковом давлении литр кислорода весит в 16 раз больше, чем литр водорода. Поскольку масса молекулы кислорода, состоящая из двух атомов, также в шестнадцать раз больше массы молекулы водорода, которая тоже состоит из двух атомов, это означает, что различные газы при одинаковом давлении содержат в данном объеме точно одинаковые числа молекул. Так как давление, как мы видели, зависит только от числа молекул, умноженного на их кинетическую энергию, ясно, что при одной и той же температуре молекулы различных газов должны иметь равную кинетическую энергию.

Как объяснит это наша теория? Чтобы ответить на вопрос, нам следует рассмотреть, что происходит, когда в одном сосуде находятся молекулы разного вида, в частности различной массы. Состояние, в котором все они имели бы одинаковые скорости, не могло бы просуществовать долгое время. Например, при лобовом столкновении тяжелой и легкой молекул, движущихся с одинаковыми скоростями, первая только очень мало изменит свою скорость, тогда как более легкая отскочит от нее и, тем самым, заметно увеличит свою скорость. Мы должны обобщить этот результат, рассмотрев не только лобовые столкновения, но и рассеяние на все углы. Если проделать это, то окажется, что в большинстве столкновений легкие атомы увеличивают, а тяжелые уменьшают свои скорости, и так продолжается, пока не будет достигнуто стационарное состояние, где в среднем оба вида молекул имеют одинаковые кинетические энергии. Следовательно, в этом отношении кинетическая теория находится в согласии с экспериментальными газовыми законами.

Итак, мы нашли, что, как того требуют и кинетическая теория и эксперимент, средняя кинетическая энергия каждого сорта молекул есть константа, умноженная на абсолютную температуру. Ее обычно записывают

в виде $\frac{3}{2} kT$, где k — известная постоянная Больцмана. Множитель $\frac{3}{2}$ введен в определение постоянной Больцмана, чтобы упростить другие формулы, в которых она появляется.

Достоверность и законы случая

Не следует, конечно, представлять себе, что все молекулы в газе действительно имеют одинаковую кинетическую энергию. Как мы уже раньше подчеркивали, траектория отдельной молекулы — очень сложная и беспорядочная кривая. Тем не менее кинетическая теория позволяет нам точно предсказать, как будет вести себя большое число молекул. В уже обсужденных примерах мы могли с уверенностью говорить о средней кинетической энергии молекул газа и его давлении. Причина нашей уверенности кроется в законе средних величин. Изучая поведения газа, мы оказываемся в одинаковом положении с дирекцией казино, в котором идет игра в рулетку. Движение шарика по кругу рулетки слишком сложно и беспорядочно, чтобы кто-нибудь мог предвидеть, где он остановится. Но можно быть уверенным, что в течение длительного времени каждый номер будет выпадать в среднем одинаково часто. Дирекция, чьи планы зависят от того, насколько это утверждение справедливо, может рассчитывать на устойчивую прибыль в течение долгого времени. Наверное, выпадение «черного» тридцать или сорок раз подряд сорвало бы банк, если бы нашелся хоть один игрок, который, рискнув на «черном» один раз, продолжал ставить весь свой выигрыш постоянно на тот же номер. Однако вероятность появления такой «черной» серии настолько мала, что ее следует полностью игнорировать. Для казино в Монте-Карло риск обанкротиться из-за такого исключительного совпадения даже менее серьезен, чем риск погибнуть при землетрясении или какой-нибудь другой стихийной катастрофе.

Пользуясь законами случая, мы можем сделать надежные предсказания всегда, когда имеем дело с большими числами. В нашем последнем примере таким большим числом было количество оборотов рулетки в течение года.

Другой знакомый пример дает страхование жизни. Жизнеспособность страховой компании зависит от того, известно ли ей, сколько из ее полисодержателей умрет в течение ближайших нескольких лет. В то время как очень трудно предвидеть смерть какого-нибудь определенного лица, мы знаем, что, имея дело с большими числами, можно надежно установить процент смертности за данный период (при условии, конечно, отсутствия войн, эпидемий и других подобных событий, которые изменяют средние цифры). Это положение вещей ярко описывается знаменитой фразой, принадлежащей Артуру Эддингтону: «Непрочность человеческой жизни вошла в пословицу; немногое в мире более надежно, чем платежеспособность страховой компании».

Для кинетической теории тепла характерно, что все ее утверждения являются статистическими, однако это не делает ее менее достоверной. Число молекул не сравнимо с числом клиентов даже самой большой страховой компании и они не подвержены таким несчастьям, как войны или эпидемии, ибо их поведение контролируется не законами общества, а законами природы.

Например, с законами механики вполне совместимо такое положение, когда ни одна молекула в данный момент не ударила бы о стенку сосуда, потому что все они оказались в другой его части, так что давление на стенку полностью бы исчезло. Или может еще случиться, что вдвое большее, чем обычно, число молекул столкнется со стенкой, или те, которые сталкиваются, будут иметь вдвое бóльшую скорость и избыток давления сломает стенку. Но в действительности нам совсем не нужно об этом беспокоиться, поскольку вероятность подобного происшествия несравненно меньше, чем даже вероятность того, что какое-нибудь число выпадет в рулетке 100 раз подряд или что в один день умрут все полисодержатели страховой компании.

В самом деле, закон вероятности утверждает, что неточность, с какой мы можем предсказать среднее число случаев, в которых наступает данное событие, равна квадратному корню из этого самого числа. Например, если из данных по рождаемости в каком-нибудь городе следует, что в среднем каждую неделю рождается 100 детей, мы

должны прибавить к этой цифре неточность порядка квадратного корня из 100, т. е. 10. Как нам следует ожидать, число рождений в этом городе в среднем за много недель колеблется от 90 до 110. Для нас не было бы еще сюрпризом найти за какую-нибудь неделю 80 или 120 рождений, но значительно менее правдоподобными будут числа 200 или 50.

Вернемся к молекулам в воздухе. Число молекул, ударяющихся в некоторый данный момент времени об один квадратный сантиметр поверхности стенки, или, что то же самое, приходящих в данный момент в фактический контакт со стенкой, бывает обычно порядка 10^{12} , или миллиона миллионов. Здесь снова применим закон квадратного корня, и следовательно, в различное время значения этого числа будут отличаться друг от друга на величину квадратного корня из него, который равен 10^6 , или одному миллиону. Иными словами, давление на квадратный сантиметр поверхности стенки меняется лишь на миллионную долю своей величины. Приборов же, которые могли бы обнаружить столь малые колебания мгновенного давления, в действительности не существует.

Имеется, однако, способ сделать эти изменения заметными. Представим себе, что мы интересуемся не давлением на квадратный сантиметр поверхности стенки, а давлением, действующим на частицу очень тонкого порошка, видимую только в мощный микроскоп. Как уже давно было известно, такие маленькие частицы движутся совершенно хаотично. Это явление было названо броуновским движением. Если размеры частицы в порошке составляют одну тысячную миллиметра, так что площадь ее поверхности равна 10^{-8} квадратных сантиметров, то в каждый данный момент о нее ударяется около десяти тысяч молекул воздуха. Мы ожидаем, в согласии с законом квадратного корня, что в разное время эти числа будут различаться приблизительно на 100, т. е. на один процент. По той же причине давление на разные участки поверхности частицы может колебаться в пределах одного процента; в один момент оно будет больше на одной стороне, а в следующий — на другой. Это выразится, очевидно, в хаотическом движении частиц порошка, что и наблюдается в действительности. Поведение такой частицы можно сравнить

с деятельностью небольшой страховой компании, имеющей очень мало полисодержателей. Ее доходы будут сильно колебаться от года к году, поскольку число новых клиентов, а также число смертей сильно меняется с течением времени.

Кинетическая теория может быть применена к изучению броуновского движения, и ее результаты снова подтверждаются опытом. Особенно просто понять это явление, представив себе, что частицы порошка — это молекулы гигантских размеров и что выводы теории относительно равенства в среднем кинетической энергии всех молекул остаются справедливыми и для такой гигантской «молекулы». Кинетическая энергия частицы поэтому была бы также в среднем равна $\frac{3}{2} kT$. Для данных выше размеров это соответствует скорости, меньшей, чем один сантиметр в секунду.

Кинетическая теория была полностью развита еще задолго до того, как появились надежные доказательства существования атомов. Хотя многие ее выводы находились в согласии с известными в то время фактами, она не давала никаких сведений о величине молекул, пока не была построена теория броуновского движения. Сделанное нами сопоставление молекул и броуновских частиц позволяет непосредственно определить постоянную Больцмана, а из нее уже можно вывести число атомов в газе. Так как кинетическая теория гораздо старше нашего знания о строении атомов, настоящая глава должна бы предшествовать главе об атомах, если бы мы стремились сохранить историческую последовательность. Я выбрал иной порядок, потому что определение размеров атомов из броуновского движения или других приложений кинетической теории связано со сложными вычислениями, которые нельзя сделать столь же наглядными, как в других случаях.

Новые эксперименты и некоторые трудности

Мы затронули пока только основы кинетической теории, но даже наиболее важные ее приложения слишком многочисленны, чтобы их можно было здесь изложить. Например, она позволяет объяснить свойства теплоем-

кости газов. Рассмотрим «одноатомный газ», в котором атомы движутся независимо, не образуя молекул, как в случае «благородного» газа гелия. Единственным результатом его нагревания является изменение поступательного движения атомов, и поэтому кинетическая энергия $\frac{3}{2} kT$ совпадает с полной тепловой энергией, сообщенной нами газу. Мы найдем, следовательно, количество тепла, содержащееся в нем, умножив $\frac{3}{2} kT$ на число атомов. Теплоемкость, которая представляет собой увеличение энергии при возрастании температуры на один градус, есть $\frac{3}{2} k$ на атом.

Однако если мы возьмем газ, молекулы которого содержат больше одного атома, то, кроме поступательного движения, последние способны также вращаться вокруг своего центра. Такое вращение возникает в процессе столкновения молекул друг с другом, и чтобы определить связанную с ним кинетическую энергию, мы должны применить статистическое рассмотрение к этим столкновениям, а также к обмену между вращательной энергией и энергией движения молекулы как целого. В результате оказывается, что на каждую степень свободы приходится одна и та же энергия. Понятие степени свободы мы ввели в конце главы 1 и нашли, что твердое тело, если отвлечься от его вращения, имеет три степени свободы. Тонкий стержень имеет пять степеней свободы, если не учитывать вращения вокруг его оси, и шесть с учетом последнего. Мы должны поэтому принять, что кинетическая энергия на каждую степень свободы есть $\frac{1}{2} kT$. Двухатомная молекула, подобная кислороду или азоту, напоминает твердый стержень, но не может вращаться вокруг оси, поскольку это соответствовало бы вращению атомов вокруг своих собственных центров. Следовательно, она имеет пять степеней свободы и ее энергия должна быть равна $\frac{5}{2} kT$. Другими словами, теплоемкость кислорода или воздуха должна составлять $\frac{5}{3}$ теплоемкости гелия, что и имеет место в действительности.

В наших рассуждениях мы предполагали, что молекула кислорода является абсолютно жесткой, т. е. ее атомы находятся на фиксированных расстояниях друг от друга. Фактически же скорее следовало бы ожидать, что это расстояние определяется соотношением между силами притяжения и отталкивания. Два атома кислорода согласно законам химии притягивают друг друга, однако если они сойдутся слишком близко, т. е. войдут в механический контакт между собой, должно возникнуть отталкивание, поскольку атомы более или менее непроницаемы друг для друга. Следовательно, должно существовать некоторое расстояние, на котором притяжение и отталкивание точно компенсируются, и именно на этом расстоянии атомы находятся в механическом равновесии, подобно гире, подвешенной на пружине. Если мы оттянем гирю вниз, натяжение в пружине превзойдет значение, при котором уравнивалась действующая на гирю сила тяжести, направленная также вниз; если же гиря находится слишком высоко, напряжение в пружине уменьшается и появляется направленная вниз результирующая сила. Имеется только одна точка, где обе силы уравниваются. Если, далее, мы толкнем подвешенную на пружине гирю, она будет колебаться вверх и вниз, пока ее не остановит трение. Точно так же мы должны ожидать, что в процессе столкновения оба атома кислорода смещаются с равновесных положений и начинаются колебания, в которых расстояние между ними периодически изменяется.

Применяя нашу теорию к столкновениям, возбуждающим такие колебания, мы снова найдем, что с соответствующей им новой степенью свободы связана средняя кинетическая энергия $\frac{1}{2}kT$. Однако в этом случае энергия существует в обеих формах, кинетической и потенциальной. Вернемся к нашему примеру пружины с гирей. В граничных точках, когда пружина максимально растянута или когда гиря поднимается против силы тяжести на наибольшую высоту, гиря останавливается, прежде чем изменить направление движения; в этот момент кинетическая энергия отсутствует и полная энергия равна потенциальной. Можно показать, что в среднем обе энергии

равны, и следовательно, колебаниям соответствует также потенциальная энергия $\frac{1}{2} kT$. Поэтому с учетом возможных колебаний молекула кислорода должна была бы содержать не $\frac{5}{2} kT$, а $\frac{7}{2} kT$, что не согласовалось бы с опытом.

Здесь мы видим противоречие между результатами кинетической теории и экспериментом. Расхождение, однако, не всегда имеет место. Некоторые молекулы обнаруживают ожидаемый вклад от своих внутренних колебаний; в частности, для тяжелых молекул при высоких температурах это справедливо всегда. Как мы убедимся, это противоречие не вызвано недостатками кинетической теории. Оно является свидетельством того, что основные законы механики теряют силу на атомных расстояниях.

Та же самая трудность возникает в еще более резкой форме, если мы вспомним, что каждый атом содержит ядро и электроны. Например, в каждом кислородном атоме находится восемь электронов, и если принять во внимание их движения, молекула кислорода имела бы не пять или шесть, а пятьдесят четыре степени свободы. Если, далее, предполагать, что столкновения приводят к беспорядочному движению электронов внутри атомов, мы пришли бы к намного большему количеству тепла, чем в действительности наблюдается. Поэтому следует заключить, что при движении таких газов, как кислород, столкновения никак не воздействуют на внутренние движения в атомах. Это очень сильно отличается от того, что можно было бы ожидать, если бы какая-нибудь звезда вместе со своими планетами очень близко подошла к нашей солнечной системе. Здесь мы находим еще одно подтверждение результата, с которым мы столкнулись в предыдущей главе. Именно, что имеется существенное различие между поведением атома и Солнца с планетами.

Хотя наши попытки дать механическое описание процессов, происходящих внутри атома, оказались пока несостоятельными, эти результаты позволяют нам рассматривать для многих целей атом как твердое тело, внутреннее движение которого с трудом поддается воздействию внешних сил.

Твердые тела и жидкости

До сих пор мы применяли кинетическую теорию для исследования поведения газов, но ее можно также использовать для того, чтобы понять строение твердых тел и жидкостей. Остановимся пока на рассмотрении твердых тел.

Как мы уже видели, химия требует, чтобы в некоторых случаях между атомами действовали силы притяжения. Но с другой стороны, это притяжение переходит в отталкивание, когда атомы входят в соприкосновение друг с другом. Тогда, если имеется большое число атомов, заключенных в малом объеме, силы будут стремиться сблизить их возможно более тесно, однако не позволяя им перекрываться. Это приведет в общем случае к некоторой упорядоченной картине. Вообразим себе, например, что атомы ведут себя как твердые шары одинакового размера, которые притягивают друг друга. Тогда они будут стремиться расположиться так, чтобы образовать «плотную упаковку», как на рис. 27. Если мелкую коробку или поднос наполнить маленькими одинаковыми шариками, например стальными шариками из шарикоподшипника, и затем немного потрясти ее, чтобы дать им возможность разместиться наиболее компактно, они сами собой расположатся слоями, как на рис. 27.

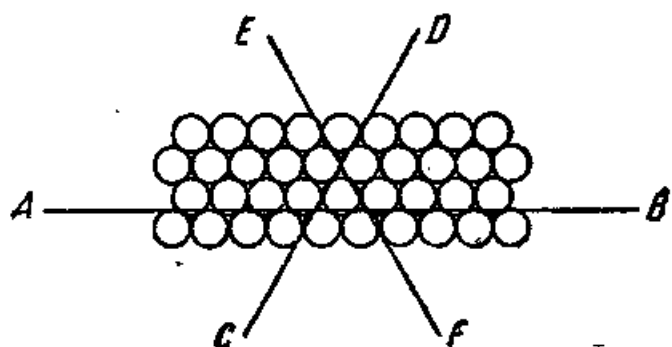


Рис. 27. Плотная упаковка шаров.

Реальные атомы могут располагаться самыми разнообразными способами, поскольку действующие между ними силы весьма различны. Атомы могут быть, например, довольно «мягкими» (напоминая скорее резиновые мячики, а не стальные шарики), и силы притяжения будут играть для них существенную роль. В сплавах различные атомы имеют не одинаковые размеры, и это тоже влияет на их расположение. Интереснее всего, однако, то, что всегда возникает правильная картина, в которой некоторая основная группа атомов периодически повторяется. Такое

правильное расположение атомов называется решеткой. Большинство твердых веществ состоит из подобных атомных решеток. Эти регулярные повторения представляют собой дифракционную решетку для рентгеновских лучей, которую мы обсуждали в предыдущей главе. Дифракцию рентгеновских лучей можно фактически использовать, чтобы определить размещение атомов в кристаллической решетке.

Во всякой правильной структуре, подобной рис. 27, имеются некоторые преимущественные направления. Например, если попытаться разделить такую структуру на две, то проще всего это сделать вдоль линий *AB*, *CD* или *EF*. Поэтому наш кристалл стремится разламываться таким образом, чтобы его грани образовывали друг с другом некоторые определенные углы. Так ведут себя многие минералы и, в частности, все драгоценные камни; крупинки сахара или соли также ясно выражают эту тенденцию. В металлах, подобных стали или алюминию, ничего похожего не происходит, так как в нормальных условиях они представляют собой мозаику из очень мелких кристалликов. Каждый из них имеет решетку, как на рис. 27, но в различных кристалликах решетки повернуты в разных направлениях. Такие структуры называются поликристаллами. Природа и размеры поликристаллов определяют основные технические свойства металлов и сплавов.

То, что атомы благодаря действующим между ними силам притяжения и отталкивания стремятся образовать правильную решетку, есть непосредственное следствие механики, хотя, не зная сил более точно, чем они пока известны, мы не можем предвидеть, какая решетка возникает в каждом данном случае.

Что же произойдет с веществом при нагревании? Очевидно, атомы придут в движение, но в твердом теле из-за действующих между ними сил они уже не будут разбегаться друг от друга и в результате начнут колебаться около своих равновесных положений. Чтобы найти, как сильны эти колебания, нужно снова применить кинетическую теорию. Оказывается, что равенство средних кинетических энергий по-прежнему выполняется. Если в нашем твердом теле находится N атомов, то каждый из них

имеет три степени свободы и, следовательно, их средняя кинетическая энергия составляет $\frac{3}{2}NkT$; потенциальная энергия снова равна в среднем кинетической, так что полная энергия колебаний равна $3NkT$. Доказательство, даваемое в кинетической теории, или статистической механике, носит несколько абстрактный характер, но его можно подтвердить, рассматривая столкновения молекул газа с поверхностью такого кристалла. Действительно, газовые молекулы в таких столкновениях в среднем не теряют и не приобретают энергии, если только их средняя кинетическая энергия равна средней кинетической энергии каждого атома в кристалле.

Итак, мы заключаем, что количество тепла, содержащегося в твердом теле при температуре T , есть $3NkT$, где N — число атомов. Теплоемкость тела равна $3Nk$. Этот «закон Дюлонга и Пти» хорошо согласуется с опытом для большинства твердых тел при условии, что температура не слишком низка, но он теряет силу для любого из тел, когда мы достаточно охладим его. Количество тепла, содержащегося в твердом теле вблизи абсолютного нуля, намного меньше, чем следует из закона. Поведение твердых тел при низких температурах является, таким образом, новым противоречием, которое указывает, что наши общие законы пока еще не совершенны.

Подобным же способом можно показать, что силами, действующими между атомами, объясняется и упругость твердых тел, т. е. тот факт, что для изменения их формы нужно затратить силу, и что они будут стремиться вернуться к своей нормальной форме.

Прочность, или, иначе, сила, которая необходима, чтобы разорвать твердое тело или создать в нем остаточную деформацию, представляет собой гораздо более трудную проблему, и только в последние двадцать лет или около того стало возможным объяснить это явление количественно.

Теперь мы можем понять, почему твердое тело плавится, т. е. становится жидкостью при нагревании до подходящей температуры. Когда температура растет, колебания каждого атома около его нормального положения становятся все более сильными. Соседи данного атома

будут также все больше и больше отклоняться от правильных положений, которые они занимали в решетке. Но это правильное положение определяется для каждого атома только его взаимодействием с соседями, и если последние сдвинуты с положений равновесия, то и стремление самого атома вернуться на свое правильное место ослабевает. Поэтому вместе с усилением колебаний атомов относительно их нормальных положений ослабевает их тенденция к образованию правильной решетки, пока, наконец, не будет достигнута точка, где порядок разрушится совсем, и распределение атомов не станет хаотичным.

Мы можем, пожалуй, сравнить твердое тело с длинной колонной солдат, марширующих в ногу. Когда они устанут, некоторые из них уже не будут должным образом держать шаг. Это не нарушает стройности марширующей колонны, пока не настанет момент, когда в поле зрения каждого солдата окажется столько же человек, идущих не в ногу, сколько и в ногу, после чего весь порядок нарушится.

Таково существо процесса плавления. Атомная гипотеза позволяет также понять, как жидкость или твердое тело превращаются в газ. Рассмотрим атомы, расположенные вблизи поверхности твердого тела или жидкости. Они колеблются, оставаясь все время под действием силы притяжения со стороны соседей. Скорость, с которой движется атом, не будет постоянной; в одни моменты движение более медленно, в другие моменты колебания атома усиливаются, поскольку может случиться, что его соседи движутся таким образом, что тянут его в каком-то определенном направлении. Время от времени оказывается, что атом приобретает скорость, достаточную, чтобы оторваться от соседей и уйти в пространство. Поэтому пространство над твердым телом или жидкостью будет содержать некоторое количество атомов, свободно движущихся, подобно атомам газа. Изредка такой атом ударяется о жидкость или твердое тело и теряет часть своей энергии в столкновениях с находящимися там другими атомами, в результате чего его энергия оказывается уже недостаточной для того, чтобы он мог снова покинуть тело. Если вначале над поверхностью газа не было совсем, то атомы будут вырываться с нее, увеличивая тем самым количество газа, до

тех пор, пока число атомов, ударяющихся о поверхность и остающихся на ней, не сравняется с числом покидающих ее. Далее, число атомов, покидающих поверхность, очевидно, зависит от температуры; чем быстрее колебания атомов, тем больше вероятность, что какой-нибудь из них приобретет достаточную энергию и оторвется от поверхности. Следовательно, как мы видим, давление насыщенного пара над твердым телом или жидкостью, т. е. давление, при котором испаряется столько же атомов, сколько конденсируется снова, возрастает с увеличением температуры.

Приведенных примеров вполне достаточно, чтобы показать, как все свойства материи, с которыми мы обычно сталкиваемся, могут быть в конечном счете сведены к механическим свойствам атомов и к законам вероятности, применимым к большому их числу. Излишне говорить, что мы еще не достигли в этой главе той ступени, когда могли бы фактически предсказать все важные механические характеристики любого вещества, исходя из основных законов, поскольку пока мы не в состоянии точно узнать, какие силы действуют между атомами. Важно, однако, что эти проблемы сводятся, как мы видели, к проблеме строения атомов и их взаимодействия, и мы могли убедиться, что поведение материи есть следствие основных законов, управляющих строением и поведением атомов.

Хотя наши заключения, базировавшиеся на механике Ньютона и кинетической теории, и были проверены многими различными способами, но мы не можем претендовать на понимание строения материи, прежде чем разрешим оставшиеся противоречия.

Тепловое излучение

Особенно важное противоречие этого рода возникает, когда мы рассматриваем излучение нагретым телом электромагнитных волн, таких как тепловое излучение или свет. Мы хорошо знакомы с этим процессом на практике. Его можно наблюдать, включив, например, электрическую плитку и дав спирали постепенно нагреваться. Вначале она не излучает видимого света, но поднеся руку ближе к ней, мы почувствуем, что она испускает тепло,

которое, как мы видели, состоит из так называемых инфракрасных волн. Когда спираль становится горячее, интенсивность этого излучения возрастает, и в конце концов появляется слабое красное свечение. Мы говорим тогда, что спираль нагрелась до «красного каления». С дальнейшим возрастанием температуры свечение делается более ярким и в то же время меняет свой цвет, переходя от красного к желтому. Для обычной электроплитки это высшая достижимая температура, но мы можем пойти дальше, наблюдая за нитью электрической лампочки, которая представляет собой точно такую же проволоку, как и спираль плитки, только еще более горячую. Ее свет гораздо интенсивнее и имеет почти такую же окраску, как солнечный. Как говорят, проволока нагрета до «белого каления». Свет от электрической дуги, которая нагрета еще сильнее, имеет голубоватый оттенок, иначе говоря, его цвет по сравнению с солнечным сдвигается дальше к синему и фиолетовому концу спектра. Угольная дуга может иметь температуру большую, чем поверхность Солнца. Оказывается, что фактически окраска и интенсивность света слабо зависят от природы нагретого тела, которое его испускает, а определяются главным образом его температурой. Идеальный случай представляет так называемое черное тело, и проблема, как объяснить интенсивность и цвет излучения, испускаемого черным телом при данной температуре, была одной из ключевых в теории тепла.

Вопрос может быть также поставлен следующим образом. Представим себе черное тело, помещенное в полость, стенки которой являются идеальным зеркалом и, следовательно, отражают излучение, ничего не поглощая. Тогда, чем больше излучения испущено телом, тем большее его количество будет двигаться вперед и назад между отражающими стенками, за исключением некоторой его части, которая снова попадет на тело и будет поглощена. Так будет продолжаться до тех пор, пока, наконец, не наступит некое стационарное состояние, в котором тело поглощает столько излучения, сколько испускает. Если мы знаем, как много излучения данного цвета имеется в стационарном состоянии, то сможем вычислить отсюда, сколько тело испускает в данный момент времени.

Применение кинетической теории к этой проблеме дает исключительно простой, но неожиданный по своим последствиям ответ. Именно, как и раньше, электрическая и магнитная энергия световых волн должна составлять в среднем $\frac{1}{2} kT$ на каждую степень свободы. Но сколько степеней свободы имеет поле излучения, или электромагнитное поле, в такой замкнутой полости? Поскольку, чтобы полностью задать электрическое поле, нужно знать

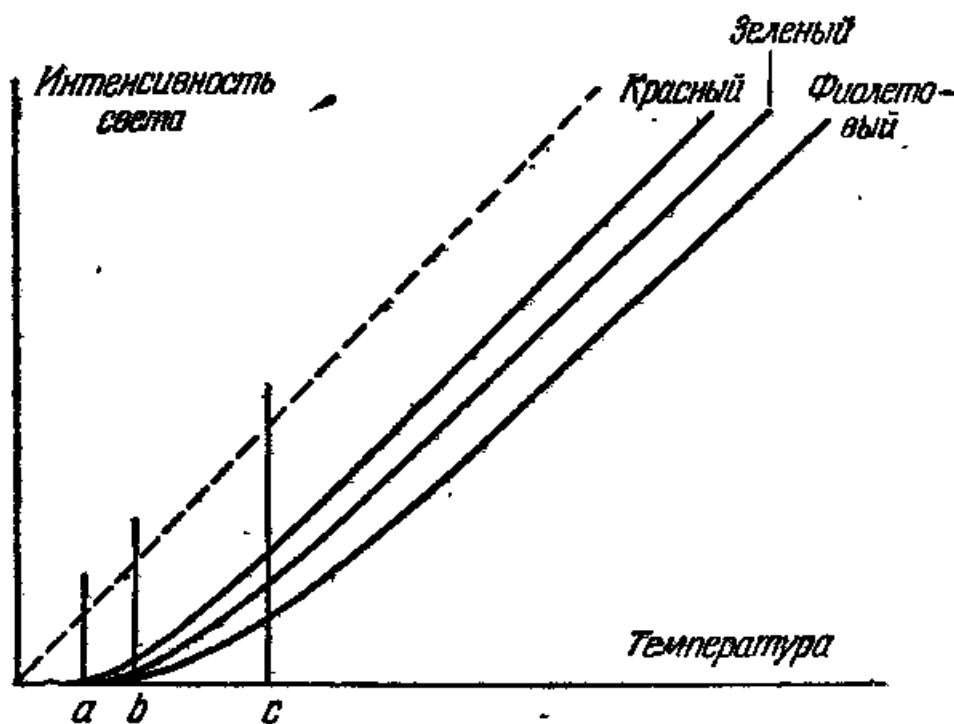


Рис. 28. Тепловое излучение.

его силу, и направление в каждой точке пространства, а число точек в нашей полости неограниченно, то получается, что имеется бесконечное число степеней свободы, и поэтому стационарное состояние никогда не будет достигнуто. Это противоречит опыту.

Сложившаяся ситуация отражена на рис. 28. Здесь показана интенсивность излучения некоторых определенных цветов при различных температурах. Температура отложена по горизонтальной оси, а интенсивность света — по вертикальной. Пунктирная линия представляет результат, следующий из простой кинетической теории, которая предсказывает, что интенсивность излучения любого цвета растет пропорционально температуре. Сплошные кривые показывают, как меняются в действительности интенсив-

ности излучений различного цвета. При высоких температурах все эти кривые идут параллельно кривой, даваемой простой кинетической теорией, и отличаются от нее только на сравнительно малую величину. Однако при низких температурах реальные кривые совершенно не похожи на предсказанную теорией. Например, при температуре, соответствующей вертикальной линии, отмеченной буквой *a*, видимый свет практически совсем отсутствует, хотя кинетическая теория и предсказывает заметную интенсивность. У точки *b* имеется заметная интенсивность красного света, но гораздо меньше зеленого и совсем нет фиолетового. У точки *c* все цвета обладают сравнимыми интенсивностями.

Здесь мы снова встречаем случай, когда предсказания кинетической теории явно теряют силу. Мы могли бы, конечно, просто прибавить его к списку уже отмеченных нами противоречий; однако именно этот случай оказался исторически особенно важным. Исследуя его причины, Планк выдвинул гипотезу кванта действия, которая открыла путь к разрешению большинства этих противоречий.

Его идеи будут занимать нас на протяжении почти всей оставшейся части книги, но при их обсуждении нам будет удобно ссылаться на другое важное достижение двадцатого столетия — теорию относительности.

ГЛАВА 6

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Общие замечания

В этой главе мы встретимся с первой из революций в научном мышлении, вызванных открытиями двадцатого века. На жаргоне физика содержание всех предыдущих глав часто называется классической физикой, в отличие от новейших, современных теорий, к которым мы и переходим.

Идеи относительности встретили сначала сильное сопротивление как со стороны физиков, так и со стороны философов. Физики отнеслись к новой гипотезе весьма критически, как они впрочем всегда относятся к новой идее, пока она не прошла требуемого ими тройного испытания. Во-первых, она должна оставлять нетронутыми успехи предыдущей работы и не обесценивать тех объяснений результатов наблюдений, которые использовались для поддержки более ранних идей. Во-вторых, она должна объяснять удовлетворительным образом новые данные, поставившие под сомнение предшествующие идеи и заставившие выдвинуть новые гипотезы. И, в-третьих, она должна предсказывать новые явления или новые соотношения между различными явлениями, которые не были известны или не были вполне поняты ко времени ее появления.

Этот процесс потребовал некоторого времени, потому что учет относительности важен лишь для объектов, движущихся со скоростью, сравнимой со скоростью света. При появлении теории возможности ее проверки были крайне ограничены, поскольку подобные объекты были трудно доступны, и во многих случаях опыты требовали

измерений исключительно высокой точности. С тех пор частицы, движущиеся с высокими скоростями, появились в любой физической лаборатории. Теперь мы не имеем дела с малыми изменениями поведения частиц, для обнаружения которых требовались бы измерения высокой точности; релятивистские особенности их движения являются большими эффектами, которые проглядеть невозможно. Грубо говоря: при проектировании машин для физических исследований инженерам приходится рассчитывать устройства стоимостью во много тысяч фунтов, необходимые исключительно из-за релятивистского характера движения частиц. Вряд ли они склонны считать это результатом праздных или ошибочных измышлений. Сегодня ни один физик, практически знакомый с опытами над быстрыми частицами, не будет оспаривать принципы теории относительности.

Возражения философов возникали потому, что теория относительности пересматривала положения, считавшиеся областью философов. Подвергалось сомнению право физиков оспаривать идеи, считавшиеся философами очевидными и неоспоримыми истинами.

Но теперь, кажется, уже широко признано, что наши представления о пространстве и времени выводятся непосредственно из познания внешнего мира, и многие положения, которые мы считаем очевидными, справедливы лишь в пределах нашего повседневного опыта. Они могут оказаться необоснованными предубеждениями, если распространить их на непривычные нам ситуации.

В истории физики такие случаи — обычное дело. Открытие вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца противоречило механической интуиции, основанной на повседневном опыте. Когда мы узнаем в школе о противодействии, встреченном сначала этой идеей, мы склонны считать средневековых ученых, которые не могли принять ее, людьми с очень узким кругозором. Но мы легко восприняли эту мысль лишь потому, что привыкли к ней с самых первых своих шагов и приняли ее до того, как наш критицизм достаточно развился, чтобы серьезно ее обсуждать.

Идея закона Галилея о том, что движущееся тело стремится продолжать свое движение, приходит в противоре-

чие с повседневным опытом и сначала вполне законно оспаривалась физиками того времени. Лишь с трудом принималась она мыслителями, которые смогли обобщить абстрактные идеи о движении.

Тот факт, что свет распространяется с конечной скоростью, также противоречит нашей интуиции. Трудно привыкнуть даже к тому, что скорость звука конечна, и когда мы наблюдаем человека, рубящего вдалеке лес, и звук удара доходит до нас после того, как мы увидим упавший топор, для уяснения этой необычной ситуации требуется сознательное напряжение чувств. Еще более твердо привыкли мы полагаться на то, что наши глаза говорят нам о внешнем мире, и считать, что даваемая ими информация — это правдивая информация о происходящем в тот момент, когда мы смотрим. В повседневном опыте на поверхности Земли нет ничего, что разрушило бы эту иллюзию, но трехсотлетний опыт астрономии и позднейшие методы необычайно точного измерения времени заставили нас признать, что скорость света конечна.

Волновая природа света ставит подобные же трудности перед нашей интуицией. Только сознательное усилие ума заставляет нас признать, что из-за дифракции волн света на резкой границе свет действительно огибает угол.

Таким образом, каждое новое достижение науки вынуждает нас оставить какой-нибудь глубоко укоренившийся предрассудок, но, наверное, все предыдущие достижения, за исключением закона Галилея, усваивались легче, потому что мы могли объяснить их на языке знакомых механических моделей. Например, конечность скорости звука приготовила нас к признанию конечности скорости света. Поведение световых волн можно наглядно представить себе, наблюдая рябь на поверхности пруда, — разница лишь в масштабе. Однако эти аналогии не годятся для усвоения идей теории относительности.

Вероятно, восприятие теории относительности несколько задержалось также из-за названия, потому что оно наводит на мысль о связи с философской концепцией относительности, согласно которой любая истина рассматривается как относительная. Но как мы увидим, физическое понятие относительности не имеет ничего общего с одноименной философской концепцией. В

теории относительности законы физики имеют точную и абсолютную форму, лишь некоторые определенные положения, казавшиеся нашей интуиции абсолютными, оказываются предубеждением.

Движение и покой

Задолго до открытий, которые привели к эйнштейновской формулировке теории относительности, было известно, что многие законы природы, в особенности законы механики, не изменяют своих проявлений, если наблюдатель, вместо того чтобы находиться в покое, будет двигаться с постоянной скоростью в одном и том же направлении.

Хорошо известно, что пассажир поезда не чувствует движения, пока вибрации вагона от неровностей дороги или ускорения, вызванные началом движения, остановкой или поворотом пути, не дадут почувствовать ему, что поезд движется. Часто на станции, взглянув через окно вагона на другой поезд, мы путаем, какой поезд начал двигаться, наш или соседний. Вопрос решается, если мы бросим взгляд на станционные здания или другие предметы которые, как мы знаем, всегда стоят неподвижно. Если бы какой-нибудь пассажир стал убеждать нас, что в действительности станция, рельсы и весь ландшафт находятся в движении, а поезд стоит на месте, и если бы на него не производил впечатления довод, что станция и окружающие предметы не ведут себя обычно подобным образом, нам было бы нелегко доказать ему, что он неправ.

Любой механический эксперимент, который мы произведем внутри купе, будет протекать точно таким же образом, как если бы поезд стоял на месте (если отвлечься от вибраций и действия закруглений пути, о чем уже упоминалось). Обычно говорят, что законы механики одинаковы для двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью (равномерно и прямолинейно).

Это очень кстати, поскольку в противоположном случае было бы гораздо труднее получить законы механики, работая на поверхности Земли, потому что, как мы знаем, в действительности Земля не находится в покое, но вра-

щается вокруг своей оси вместе с нами, нашей лабораторией и измерительной аппаратурой и движет нас в пространстве со скоростью около тысячи миль в час. Это движение не равномерное и прямолинейное, а движение по кругу, и поэтому, как мы видели в главе 4, оно создает ускорение. Но изменение направления движения очень медленное, потому что период обращения равен 24 часам. В то время как скорость очень велика по сравнению с привычными нам скоростями, величина ускорения очень мала. Наличие ускорения может быть обнаружено, например, так называемым маятником Фуко, скорость же сама по себе не оказывает влияния ни на какой механический процесс.

Помимо этого, с еще большей скоростью вся Земля движется по своей орбите вокруг Солнца, а Солнце со всеми планетами в свою очередь движется относительно звезд.

Итак, законы механики не дают нам возможности отличить равномерное и прямолинейное движение от покоя, однако это будет не так при включении в наше описание природы электричества и света. При обсуждении законов электромагнитного поля в главе 2 мы обнаружили, что электромагнитные волны, включающие в себя и свет, всегда распространяются с постоянной скоростью, которую мы обозначили через c . Мы можем надеяться обнаружить некоторую разницу в измеряемой скорости распространения света благодаря тому, что мы сами движемся. Например, если бы единственным движением было вращение Земли, то свет фонаря, расположенного восточнее нас, попадал бы в наш глаз быстрее, поскольку наш глаз движется по направлению к фонарю и поэтому навстречу световым волнам. Аналогично, должно казаться, что свет от фонаря, расположенного в западном направлении, распространяется медленнее, поскольку ему надо догнать наш глаз, движущийся от него прочь. Если u есть скорость, с которой движется поверхность Земли, то кажущаяся скорость света от источника, находящегося на востоке, должна быть $c+u$, а от источника на западе — $c-u$. Разница, конечно, очень мала, потому что u примерно в миллион раз меньше c , но точные эксперименты должны эту разницу обнаружить.

Этот ожидаемый результат называли иногда «эфирным ветром», поскольку в то время думали, что все пространство заполнено гипотетической средой, называемой эфиром, играющей роль носителя электромагнитных волн. Влияние нашего движения сквозь эфир на распространение света считалось сходным с действием сильного ветра на распространение звука: хорошо известно, что звук кажется распространяющимся гораздо быстрее по ветру, чем против ветра.

Майкельсон и Морли в своих знаменитых экспериментах решили обнаружить этот «эфирный ветер». Чтобы избежать трудностей измерения расстояний и времен с требуемой высокой точностью, они расщепляли луч света на две части. Одна часть двигалась, например, в направлении с востока на запад и обратно после отражения от зеркала; другая — в направлении с севера на юг, до другого зеркала и обратно. Будучи соединены снова, эти два луча света должны образовать интерференционные полосы рассмотренного в главе 3 типа. Расположение этих полос зависит от того, как много колебаний совершила каждая волна света за время своего пути. Нетрудно рассчитать время, потребовавшееся каждому лучу света на путь в оба конца. Вычисление, которое мы здесь опускаем, показывает, что эффект движения Земли таков же, как если бы плечо прибора, лежащее в направлении с востока на запад, удлинилось в отношении 1 к $\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$. Трудно измерить длину пути света с требуемой точностью, но Майкельсон предложил повернуть прибор на прямой угол, так что теперь другое плечо прибора будет расположено в направлении с востока на запад, что удлинит время распространения одного луча света и укоротит время другого и приведет к сдвигу интерференционных полос. Поскольку Земля не только вращается, но и движется по орбите вокруг Солнца, эффективная скорость нашего движения будет также изменяться от дня к ночи. Поэтому, даже если не трогать аппарат, полосы должны изменять свое положение в течение дня.

Результат такого эксперимента был полностью отрицательным. В каком бы направлении ни располагать аппаратуру и как бы долго ни вести наблюдения, не наблю-

дается никакого сдвига полос. Также потерпели неудачу все другие попытки наблюдать «эфирный ветер». Следовательно, целая группа экспериментов, с помощью которых казалось возможным отличить движение от покоя, оказалась несостоятельной.

Лорентцево сокращение

Потребовалось продолжительное время, чтобы полностью понять значение этих результатов. Предлагались различные объяснения. Предполагалось, например, что скорость света может зависеть от скорости движения источника. Поскольку в опыте Майкельсона использовался фонарь, закрепленный на поверхности Земли, можно было думать, что свет распространяется с постоянной скоростью относительно этого источника, т. е. относительно поверхности Земли. Подумав, мы должны, однако, оставить это объяснение, потому что, например, свет Солнца в действительности испускается атомами его атмосферы, которые, как нам известно из предыдущей главы, хаотически движутся с большими скоростями. Если это объяснение справедливо, то свет, испускаемый различными атомами, должен распространяться с различной скоростью. Если взглянуть не на Солнце, а на какую-нибудь удаленную звезду; которая подобна Солнцу, но находится гораздо дальше, то мы должны увидеть ее не как точку, а в виде черточки, так как свет от различных атомов звезды должен распространяться к нам с различными скоростями и должен начинать свое движение, когда звезда находится в различных положениях относительно нашего телескопа.

Предполагалось также, что в окрестности Земли эфир должен частично принимать участие в ее движении, так что вокруг нас образуется «атмосфера» эфира, движущегося таким же образом, как и сама Земля. Эта гипотеза также не выдерживает критики, потому что, если бы дело обстояло так, то где-нибудь за пределами Земли должна была бы быть переходная область, где эфир переходит в состояние, соответствующее свободному пространству. Это должно приводить к преломлению световых лучей и видимому смещению положений звезд, чего не наблюдается.

Рассматривались и другие возможности, но столь же безуспешно. Ближе к истине оказалось предположение Г. А. Лорентца, которое на первый взгляд кажется очень неправдоподобным. Лорентц предположил, что каждый движущийся предмет сжимается в направлении движения в отношении $\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$ к 1, где u — скорость. Если плечо прибора Майкельсона, расположенное в направлении движения, действительно сжимается таким образом, то это как раз будет соответствовать «эфирному ветру». На первый взгляд это «лорентцево сокращение» кажется очень искусственным и необоснованным. Действительно, представляется, будто природа задумала устроить свои законы так, чтобы затруднить нам наблюдение эфирного ветра. В механике нет причин, благодаря которым тела должны испытывать это своеобразное сокращение.

Однако для этого предположения существовали гораздо большие основания, чем может показаться на первый взгляд, потому что Лорентц уже знал, что всякое вещество, как мы видели в главе 4, состоит из атомов, что атомы содержат положительно и отрицательно заряженные частицы и что силы, удерживающие их вместе, являются электрическими. Но в законах электричества и магнетизма скорость света проявляется как постоянная. Если заряженные частицы движутся со скоростью не очень малой по сравнению со скоростью света, их электрические поля становятся более сложными. Точечный заряд, например атомное ядро, имеет электрическое поле, потенциал которого зависит только от расстояния до заряда, так что все точки сферы, центром которой является заряд, находятся под одним и тем же потенциалом. Движущийся же заряд порождает не только электрическое, но и магнитное поле, потому что движение электрического заряда эквивалентно электрическому току.

Кроме того, электрическое и магнитное поля в любой точке, вблизи которой проходит заряд, изменяются со временем. Мы видели в главе 2, что в законах физики возникают усложнения для изменяющихся во времени электрических и магнитных полей. Эта сложная математическая проблема может быть решена, и в результате получается, что поверхности постоянного потенциала не являют-

ся более сферами, а сплющиваются в направлении движения на величину, требуемую лорентцевым сокращением.

Это изменение электрических сил безусловно вызовет изменение в размерах и форме атома и в расстояниях различных атомов друг от друга. В то время об атомной структуре не было известно достаточно, чтобы сказать, каков будет полный эффект. Но появилась, по крайней мере, возможность объяснить лорентцево сокращение как следствие эффекта движения на электрические силы, удерживающие атомы вместе.

Идея лорентцева сокращения могла бы объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона, но, с другой стороны, она открывает, на первый взгляд, новую возможность отличить, находится ли тело в покое или в движении. Для простоты рассмотрим опять движение, связанное только вращению Земли, и рассмотрим очень точно измеренный куб, одно из ребер которого направлено с севера на юг. Если мы повернем его на прямой угол, то ребро, которое располагалось в направлении север—юг и теперь направлено с востока на запад, испытает лорентцево сокращение, а другое горизонтальное ребро, которое раньше располагалось в направлении с востока на запад и поэтому было сжато, расширится. В новом положении измерения должны показать нам, что тело более не является кубом.

Прежде всего, величина лорентцева сокращения столь мала, что наблюдать изменение было бы чрезвычайно трудно, но мы можем себе представить, что располагаем измерительными инструментами, достаточно точными, чтобы это сделать.

Однако мы встретим более фундаментальную трудность. Единственным способом измерения длины является сравнение ее прямо или косвенно с измерительной линейкой или рулеткой. Сама измерительная линейка, как и все другие твердые тела, подвержена лорентцеву сокращению и поэтому, когда мы приложим ее сначала к одному ребру, а затем к другому, она испытает лорентцево сокращение. Оба ребра будут казаться имеющими одинаковую длину, если судить по отметкам на линейке.

Если последовательно применять постулат Лорентца ко всем без исключения твердым телам, то оказывается принципиально невозможным наблюдать сокращение каким бы то ни было прямым измерением.

Как сравнивать длины и времена

Можно подумать, однако, что лорентцево сокращение является удобным способом обнаружить, который из двух встречающихся поездов стоит на месте, а который движется. Предположим, что вагоны обоих поездов имеют одинаковую конструкцию и что вагон движущегося поезда испытал сокращение и стал короче, чем вагон стоящего поезда. Для простоты вообразим на мгновение, что скорость движущегося поезда составляет не одну миллион-

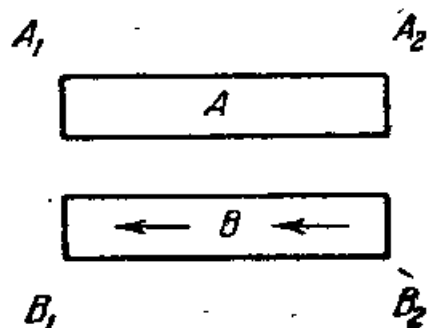


Рис. 29. Движущиеся поезда.

ную, а одну треть скорости света; тогда лорентцево сокращение составит пять процентов, что легко будет заметить. Все, что нам нужно сделать, это тщательно наблюдать прохождение одного вагона мимо другого и заметить, который длиннее.

Однако все это гораздо сложнее, чем кажется, так как мы имеем дело с очень большими скоростями и очень короткими интервалами времени. Чтобы уяснить это, рассмотрим рис. 29. A соответствует покоящемуся вагону, B — движущемуся. Если B действительно короче, то в момент, когда его передний край B_1 находится на одной линии с передним краем A_1 покоящегося вагона, конец его B_2 уже прошел конец A_2 покоящегося вагона. Но, чтобы не сомневаться в этом, необходимо быть уверенным в правильности нашего измерения времени. Если мы взглянем на B_2 чуть раньше, окажется, что он еще не прошел A_2 , и мы сочтем вагон B более длинным. Другими словами, сравнивая длины обоих вагонов, мы углубляемся в обсуждение нашей возможности определять с большой точностью моменты прохождения концов вагонов один мимо другого. Движущийся вагон длиннее или

короче, если конец его B_2 проходит мимо A_2 после или до того, как конец B_1 проходит мимо A_1 .

Конечно, мы можем посмотреть одновременно на оба конца, но тогда появляются трудности, связанные с конечностью скорости распространения света. Предположим, что мы находимся в точке A_1 . Когда мы наблюдаем прохождение B_1 , мы видим конец B_2 не в тот же момент, но раньше на некоторое очень небольшое время, требующееся, чтобы свет прошел от B_2 до A_1 . Правда, мы можем это учесть, поскольку скорость распространения света мы знаем, но для нахождения поправки надо прежде всего знать длину нашего вагона, т. е. нам следует предположить, что вагон находится в покое и поэтому не испытывает лорентцева сокращения, а также предположить, что свет распространяется со своей обычной скоростью и нет никакого эфирного ветра.

Мы можем попытаться получить сигнал времени в A_2 через пункт A_1 каким-нибудь другим путем. Можно представить себе, что находящийся в A_2 помощник нажимает кнопку при прохождении B_2 и это дает какой-то сигнал в A_1 ; но эта передача может осуществляться механически, электрическим током или другим устройством, а все эти средства связи дают сигналы более медленные, чем скорость света. Вычисление скорости их распространения с требуемой точностью приводит нас к той же трудности.

Ограничимся в таком случае световыми сигналами и рассмотрим, каким будет казаться весь процесс с точки зрения наблюдателя на другом поезде, пытающегося произвести те же измерения. Он также будет наблюдать прохождение A_2 мимо B_2 и A_1 мимо B_1 и также будет передавать световой сигнал с одного конца вагона на другой и применять такие же поправки на время, как это принималось. Естественно, он будет предполагать, что его поезд покоится, и не станет вносить поправок на эфирный ветер или лорентцево сокращение. Интересно, что, поступая подобным образом, он на тех же основаниях придет к заключению, что наш вагон испытал лорентцево сокращение, т. е. A_1 и B_1 оказываются на одной линии *прежде*, чем A_2 оказывается на одной линии с B_2 .

Важно понять, что наблюдения обоих наблюдателей полностью равноправны. Мы приходим к выводу, что вагон

В находится в движении и испытывает поэтому лорентцево сокращение, в то время как другой наблюдатель, исходя из предположения, что его вагон находится в покое, заключает, что движется наш вагон А и поэтому сокращается. Без сомнения, мы будем критиковать его, поскольку он сделал кажущиеся нам ошибочными предположения о длине своего вагона и об отсутствии эфирного ветра, но в ответ он укажет нам, что с его точки зрения та же критика относится и к нашему методу.

Сущность доводов, являющихся упрощением использованных Эйнштейном, заключается в том, что длина предмета не имеет абсолютного значения, но зависит от состояния движения наблюдателя, который ее определяет. Аналогично, вопрос о времени, т. е. о том, которое из двух событий, случившихся в двух удаленных точках, наступило раньше, не имеет абсолютного смысла, а зависит от точки зрения наблюдателя.

Эти идеи в самом деле находятся в противоречии с нашей интуицией, которая воспринимает длину как неизменную величину, а время, когда случилось событие, — как абсолютное понятие, не связанное органически с каким-либо реальным процессом измерения. Приходится прижиться с мыслью, что уверенность, с которой мы принимаем эти вещи как несомненные, проистекает только из опыта повседневной жизни. На практике любая неточность в истинном значении длины движущегося предмета (например, вагона железной дороги) полностью пренебрежима в сравнении с пределами ошибок любого реального определения длины. На практике мы никогда не беспокоимся о справедливости того, что любой процесс, который мы можем видеть, имеет место в тот момент, когда мы его наблюдаем, поскольку для практических целей скорость света может считаться бесконечно большой.

Одно из достоинств теории Эйнштейна заключается в том, что она ясно выпятила тот факт, что наши представления о пространстве и времени извлекаются из опыта, и когда мы их прилагаем к ситуациям, где встречаются большие скорости или более короткие времена, чем те, к которым мы привыкли, мы не можем не сомневаться в их смысле, не определив их более точно. Это же

может быть достигнуто лишь формулировкой вопросов, ответ на которые могут дать только прямые наблюдения.

Таким образом, мы обнаруживаем, что постулат о лорентцевом сокращении совместим с принципом тождественности законов природы для двух наблюдателей, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, и что не существует опыта, который мог бы дать предпочтение точке зрения одного наблюдателя перед точкой зрения другого.

Связь между наблюдениями различных наблюдателей может быть выражена при помощи диаграмм. Рис. 30 показывает пример диаграммы, где по горизонтали отложены расстояния, а по вертикали — промежутки времени. Горизонтальная ось OX изображает некоторую линию, например рассматриваемый железнодорожный путь, в определенный момент времени, который мы принимаем за нуль времени. Вдоль нее мы сделали отметки, соответствующие одинаковым расстояниям, — «верстовые столбы» m_1, m_2, m_3 и т. д.

Вертикальная ось Ot указывает на течение времени в начальной точке O , а t_1, t_2, t_3 отмечают равные интервалы времени. Соответствующие горизонтальные линии изображают снова путь в более поздние моменты времени, а соответствующие вертикальные линии — течение времени близ различных «верстовых столбов». Подобные диаграммы действительно употребляются при построении временных зависимостей, потому что наклонной линией OP или m_1Q на них можно, например, изобразить движение поезда и, взглянув на график, можно сказать, в какой момент поезд пройдет определенную точку или когда встретятся два поезда. В нашем случае будем считать, что OP и m_1Q изображают два конца вагона движущегося поезда.

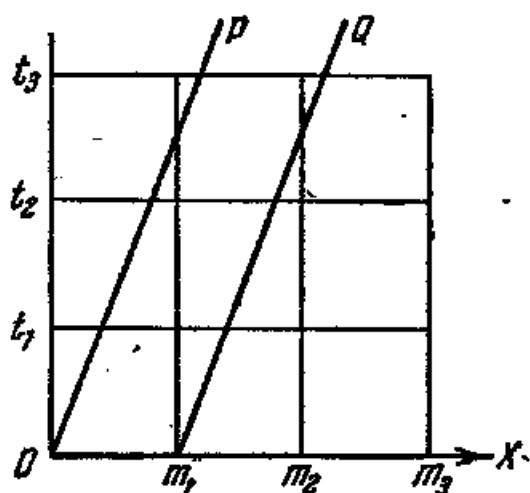


Рис. 30. График зависимости пути от времени.

Как будут относиться к нашим результатам результаты наблюдателя на движущемся поезде, если он также будет делать на нем отметки расстояний и отмечать моменты времени? В случае реального поезда, когда все скорости малы в сравнении со световой и эффекты теории относительности несущественны, картина представляется рис. 31 а. Наклонные линии изображают теперь точки, которые наблюдателю, находящемуся на поезде, кажутся

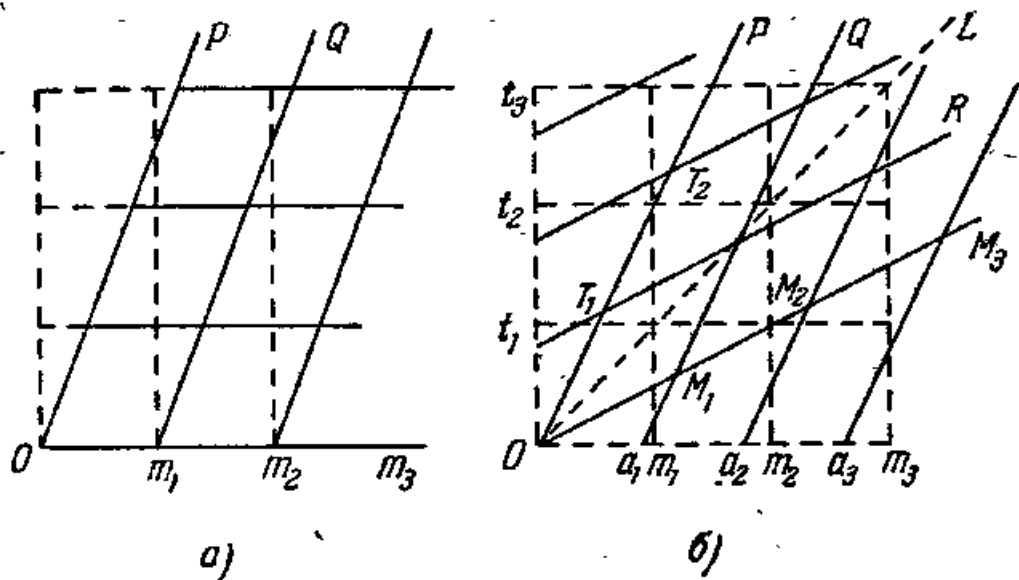


Рис. 31. а — движущийся наблюдатель, малые скорости; б — движущийся наблюдатель, скорость равна половине скорости света.

покоящимися и которые он считает теперь отметками расстояний; действительно, конец каждого вагона является для него измерительной вехой. Наши собственные «верстовые столбы» также изображены для сравнения в виде пунктирных линий; отметки времени одни и те же и для него и для нас, поскольку, если не учитывать релятивистских эффектов, время одно и то же для всех наблюдателей.

Сравним с этим релятивистскую картину, получающуюся, когда мы имеем дело с действительно большими скоростями. Для этой цели мы должны перейти к другому масштабу; на рис. 31, б изображено положение, когда предполагается, что наши «верстовые столбы» расположены столь далеко друг от друга, что свет распространяется от одного до другого как раз за один интервал времени (например, если интервал времени есть одна секунда, то

расстояние между столбами должно быть 300 000 км). В этом масштабе движение любого реального поезда будет изображаться практически вертикальной линией, на рисунке же мы изобразили случай «поезда», движущегося со скоростью, равной половине скорости света. Снова OP и a_1Q изображают движение конца и начала вагона. a_1 не совпадает теперь с m_1 , поскольку благодаря лорентцеву сокращению вагон кажется укоротившимся и в один и тот же момент времени он занимает меньше места, чем расстояние между O и m_1 . Между тем отметки времени движущегося наблюдателя даются теперь наклонными линиями, подобными $OM_1M_2M_3$ и т. д., и поэтому, чтобы найти длину нашего вагона, движущийся наблюдатель должен заметить, какой отрезок этой линии отсекается линиями, соответствующими обоим концам нашего вагона, т. е. двумя вертикальными пунктирными линиями, проведенными через O и m_1 . Вторая вертикальная линия проходит слева от M_1 , и поэтому движущийся наблюдатель найдет, что наш вагон короче, чем его.

Таким образом, диаграмма в графической форме повторяет то, что мы уже обсудили на словах, и, кроме того, позволяет сделать дальнейшие заключения. Рассмотрим пунктирную линию OL . Она соответствует распространению светового сигнала, поскольку при движении вдоль этой линии за один интервал времени проходится как раз расстояние до следующего «верстового столба» и по условию это как раз определяет скорость света. Мы знаем из опыта Майкельсона, что скорость света должна казаться той же самой и движущемуся наблюдателю и линия поэтому должна делить пополам угол координатной сетки. Диаграмма нарисована в согласии с этим, и мы видим, что более поздние отметки времени движущегося наблюдателя, например T_1R , пересекут наши отметки времени между Ot_1 и OP .

Из этого мы можем вывести влияние эффекта движения на измерение времени, т. е. на часы. Если наблюдатель имеет часы, которые синхронизованы с покоящимися часами при прохождении точки O , то он отметит прохождение точно одного интервала времени в T_1 , но для нас этот момент наступит позже, чем t_1 . Поэтому мы заключаем, что часы движущегося наблюдателя отстают. Из симметрии

рисунка можно заключить, что они отстают как раз в том же отношении, в каком расстояние испытало лорентцево сокращение. Эффект движущихся часов известен как замедление времени. Опять с тем же точно правом наблюдатель на поезде заключит, что отстают наши часы, потому что их отметка времени t , лежит выше линии T_1R , т. е., с его точки зрения, наступает после окончания первого интервала времени.

Это предсказанное замедление времени может непосредственно быть связано с известным поведением быстрых частиц, как мы это увидим в главе 11.

Сложение скоростей

Новые соотношения между измерениями времени и расстояний, получаемые разными наблюдателями, должны привести к новым законам сложения скоростей. Если человек, находящийся на движущемся со скоростью u поезде, выстреливает по направлению движения из пушки, сообщая снаряду скорость v относительно поезда, то полная наблюдаемая с земли скорость должна быть $u+v$. Но в теории относительности мы должны преобразовать путь снаряда, представляющийся наблюдателю на поезде просто как движение со скоростью v ; внося поправки на различие точек зрения, мы получаем результат: $\frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}$. Если как u , так и v малы в сравнении

со скоростью света c , второй член знаменателя очень мал по сравнению с единицей и в результате опять получаем простое сложение скоростей. Но если u и v не столь малы, ответ получается иным. Если, например, u и v равны каждой половине скорости света, то суммарный эффект обеих скоростей есть $\frac{4}{5}c$. Легко видеть, что если как u , так и v меньше скорости света, то, как бы ни были они к ней близки, результирующая скорость останется меньшей, чем скорость света.

Это правило справедливо, только если обе скорости имеют одинаковое направление. В более общем случае формула сложнее, и мы не будем здесь ее приводить.

Очевидно одно замечательное свойство закона сложения скоростей. Если $v = c$, т. е. вместо того, чтобы стрелять из пушки, человек на поезде посылает световой сигнал, то суммарная скорость опять равна c ; это снова приводит нас к исходному пункту, а именно, что свет относительно обоих наблюдателей кажется распространяющимся с одной и той же скоростью.

Принцип постоянства скорости света является одним из самых фундаментальных законов теории относительности. Во избежание неправильного понимания следует подчеркнуть, что везде, где мы говорили о скорости света, в действительности мы должны говорить о скорости света в пустоте. В любой материальной среде, даже в воздухе, и вплоть до таких плотных сред, как вода или стекло, скорость света иная, о чем мы судим по явлению преломления света, как говорилось об этом в главе 3. Это вызвано воздействием световых волн на электрические заряды, содержащиеся в атомах. Световой луч, проходя через стекло, не будет уже казаться распространяющимся относительно различных наблюдателей с одной и той же скоростью. Это не удивительно, потому что отличаются условия, в которых находятся наблюдатели. Для одного стекло или вода находятся в покое, а для другого они движутся. Именно при изучении распространения электромагнитных волн в движущихся телах Эйнштейн пришел к ясному пониманию изложенных выше идей.

Механика быстро движущихся тел

Это новое понимание свойств расстояний и промежутков времени требует от нас изменения законов механики, прилагаемых к быстро движущимся телам; чтобы увидеть, какие требуются изменения, можно рассуждать следующим образом: посмотрим на формулу второго закона Ньютона в том виде, в котором сила приравнивается скорости изменения импульса. Перед тем как обобщить этот закон, нам следует уяснить, что как понятие силы, так и понятие импульса нуждаются в пересмотре; форма, которую примет закон механики, будет зависеть в известной мере от того, которое из этих двух понятий оставить неизменным.

Оказывается, что наиболее ясная формулировка получается, если мы сохраняем закон равенства действия и противодействия, гласящий, что силы, с которыми два тела действуют друг на друга, должны быть равны по величине и направлены в противоположные стороны. В результате этого взаимодействие между двумя телами не изменяет полного импульса.

Мы хотим оставить также закон сохранения энергии, в частности механической энергии, если мы имеем дело с упругими соударениями. Рассмотрим соударение двух одинаковых упругих предметов, например двух бильiardных шаров. Если они сталкиваются, имея одинаковые и противоположно направленные скорости, полный их импульс

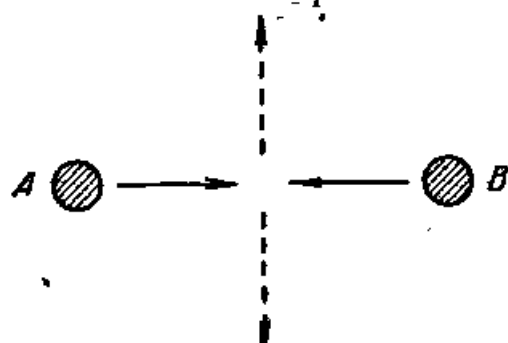


Рис. 32. Столкновение двух тел.

равен нулю, и если он сохраняется, то должен считаться нулем и после столкновения. Это означает, что после столкновения оба бильiardных шара опять должны двигаться с одинаковыми и направленными в противоположные стороны скоростями.

На рис. 32 мы изобразили два таких сталкивающихся шара; стрелки обозначают их скорости до столкновения; одинаковые длины стрелок должны означать равенство скоростей шаров. Предположим теперь, что они столкнулись таким образом, что разошлись под прямым углом к первоначальному направлению. Это показано на рисунке пунктирными стрелками. Величины скоростей снова должны быть равны. Более того, закон сохранения энергии требует, чтобы скорости, с которыми разлетаются шары, были равны скоростям, с которыми они сталкиваются. Если скорость сближения u , то полная кинетическая энергия перед столкновением равна удвоенной кинетической энергии шара, движущегося со скоростью u , а если они и разлетаются со скоростью u , то такой же останется и конечная энергия. Заметим, что этот аргумент справедлив независимо от того, по какому закону зависит кинетическая энергия от скорости.

Мы заключаем, что ситуация, изображенная на рис. 32, является механически возможной, т. е. удовлетворяет

законам сохранения импульса и энергии. Если законы механики одинаковы для всех наблюдателей, то законы сохранения энергии и импульса в таких же процессах должны представляться выполненными и движущемуся наблюдателю. Предположим,

что движущийся наблюдатель движется справа налево со скоростью v так, что шар A ему кажется движущимся быстрее, а шар B медленнее, чем прежде; после столкновения, очевидно, шары будут двигаться не под прямым углом к первоначальному направлению движения, а со смещением в правую

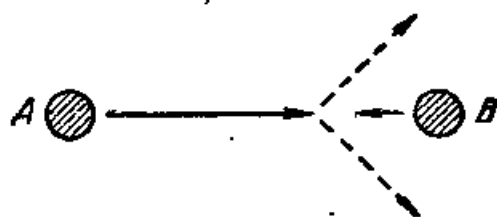
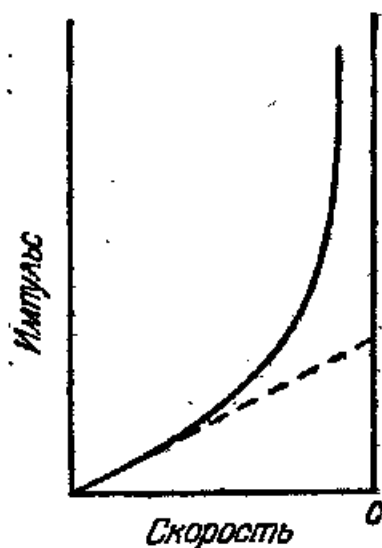


Рис. 33. Столкновение, изображенное на рис. 32, с точки зрения движущегося наблюдателя.

сторону. Это показано на рис. 33. Важно, что из закона сложения скоростей мы можем определить направления и величины всех скоростей, видимых движущимся наблюдателем, т. е. направления и длины стрелок на рис. 33.



Импульс и энергия сохраняются и в этом случае; это даст нам некоторые сведения об импульсе и энергии тел, движущихся с различными скоростями. Я не буду приводить здесь детали этих вычислений, что требует применения математики в несколько большем объеме, во всяком случае из них зависимость энергии и импульса от скорости частицы может быть определена вполне однозначно. В результате импульс p тела с массой m , движущегося со скоростью u ,

Рис. 34. Импульс и скорость. получается равным
$$p = \frac{mu}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Это соотношение между импульсом и скоростью представлено графически на рис. 34. Сплошная линия дает релятивистское соотношение, а пунктирная представляет закон ньютоновской механики, где $p = mu$. Видно, что для малых u релятивистский импульс такой же, как и прежде, но для скоростей, близких к скорости света, он гораздо больше

импульса ньютоновской механики. Этот же результат может быть выражен другим путем; мы можем по-прежнему сохранить определение импульса как произведения массы на скорость, однако мы должны быть готовыми считать массу тела переменной. Если мы обозначим через M величину
$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}},$$
 то импульс действительно бу-

дет $p = Mu$. Чтобы различать два определения массы, ~~никогда~~ называют m «массой покоя» тела, т. е. массой, которую мы определяем динамическими измерениями, когда тело находится в покое или движется очень медленно. Но даже если мы используем понятие переменной массы, следует помнить, что мы не можем выразить закон динамики в форме равенства силы произведению массы на ускорение. Сила должна браться как скорость изменения импульса, т. е. скорость изменения произведения массы на скорость. Это не одно и то же, если во время движения изменяется также и масса.

Этот результат говорит о том, что если скорость предмета приближается к скорости света, то ускорять его становится все труднее и труднее. На самом деле, чтобы заставить его в любое конечное время достичь скорости света, потребуется бесконечно большая сила. Поэтому очевидно, что никакой материальный объект никогда не может достичь скорости света или превзойти ее. Этот результат подтверждает состоятельность нашей точки зрения. Если бы наши соображения об отношениях между различными наблюдателями можно было применить к человеку, находящемуся на поезде, который движется со скоростью, большей скорости света, то мы немедленно оказались бы перед парадоксами.

Что касается кинетической энергии, то набросанные мной соображения указывают, что
$$E_{\text{кин}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2.$$

Это соотношение графически изображено на рис. 35, где опять сплошная кривая дает релятивистское соотношение между кинетической энергией и скоростью, а пунктирная — соотношение $E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}mu^2$. Как и прежде, ньюто-

новский закон справедлив при малых скоростях, а при высоких скоростях энергия движущегося объекта гораздо больше, чем она была бы согласно старой механике, и тело, действительно движущееся со скоростью света, имело бы бесконечную энергию.

Используя определение переменной массы M , мы можем выразить наш результат для кинетической энергии как $E_{\text{кин}} = (M - m)c^2$ или как увеличение массы тела с ростом его кинетической энергии. Величина приращения кинетической энергии как раз равна произведению приращения массы на квадрат скорости света. Это приводит к тесной связи массы и энергии, хотя до сих пор это утверждение относилось только к кинетической энергии. Легко доказать, что и в любой иной форме увеличение энергии должно приводить к приращению массы. Чтобы увидеть это, достаточно рассмотреть столкновение не двух упругих объектов, а двух полностью неупругих тел, например двух комков глины, имеющих одинаковую массу.

Столкнувшись с одинаковыми и противоположно направленными скоростями, они слипнутся. Так как полный импульс равен нулю, образовавшийся ком не получит импульса и останется в покое. На этот процесс мы можем смотреть с точки зрения движущегося наблюдателя и опять потребовать сохранения импульса. Вычислив наблюдаемые скорости для нового наблюдателя, мы обнаружим, что импульс не может сохраняться, если образовавшийся комок имеет массу, равную просто сумме масс покоя отдельных комков. Его масса покоя должна возрасти как раз на величину превратившейся в тепло энергии, поделенную на c^2 . Следовательно, соотношение между массой и энергией включает также тепловую энергию и, поскольку каким-нибудь внутренним механизмом мы можем превратить теплоту в электричество или вызвать какую-либо химическую реакцию, то же самое должно иметь место для энергии в любой другой форме.

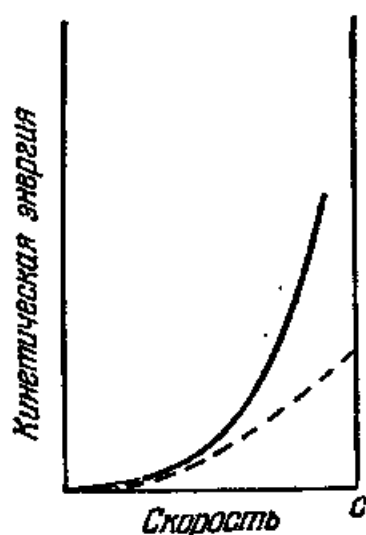


Рис. 35. Кинетическая энергия и скорость.

Таким образом, мы обнаружили эквивалентность массы и энергии в форме: при любом изменении энергии от E_1 до E_2 масса изменится от M_1 до M_2 , так что $E_2 - E_1 = (M_2 - M_1) c^2$.

Если это так для любых изменений массы, то естественно подумать, не эквивалентна ли масса покоя тела некоторой форме энергии? До сих пор во всех наших рассуждениях энергия всегда проявлялась только через закон сохранения энергии, который сравнивает значения энергии до и после некоторого процесса. Поэтому ничто не изменится, если ко всем энергиям прибавить постоянную, так как эта константа появляется всегда с обеих сторон равенства. До тех пор, пока объекты (имеющие массу покоя) не исчезают и не возникают, несущественно, включаем мы или нет величину mc^2 как их «энергию покоя»; обычно включают mc^2 , поскольку мы можем вообще утверждать, что всякая масса эквивалентна энергии и наоборот. Но это общее утверждение содержит больше чем просто удобство, потому что, как мы увидим позднее, электроны и другие частицы можно порождать, и требуемая для этого энергия действительно определяется величиной mc^2 .

Приложения и подтверждения теории

Из чтения этой главы читатель мог вынести впечатление, что мы построили тщательно разработанную систему доводов, основанных на одном экспериментальном факте, а именно на отрицательном результате опыта Майкельсона. Как бы ни был убедителен этот эксперимент и как бы ни были привлекательны общие принципы независимости всех законов физики от состояния движения наблюдателя, нельзя принимать подобные далеко идущие заключения без дальнейшего существенного подтверждения. Действительно, некоторые физики время от времени утверждали, что они обнаруживали положительный результат, повторяя опыт Майкельсона, но тем временем другие доводы в пользу теории относительности стали столь сильны, что у нас нет причины изменять наши взгляды, если бы даже обнаружилась какая-нибудь фундаментальная брешь в рассуждениях Майкельсона.

Подобные подтверждения практически вытекают из любых наблюдений над поведением частиц, движущихся с большими скоростями. Исторически самые первые наблюдения были произведены над электронами, поскольку они — самые легкие частицы и поэтому легче всего могут быть ускорены до скоростей, близких к скорости света. Например, скорость в $0,8c$ электрон приобретает, пройдя электрическое поле с разностью потенциалов около 300 000 вольт, которое легко достижимо в любой современной лаборатории. При этой скорости кинетическая энергия примерно в два раза больше, чем она была бы согласно нерелятивистской механике, и особенности поведения электрона очень заметны.

Ранние эксперименты, проводившиеся с гораздо меньшими напряжениями, но в которых тщательно измерялось отклонение электронов в электрическом и магнитном полях, обнаружили изменяемость массы и подтвердили тем релятивистскую механику. Быть может, самую яркую демонстрацию релятивистских особенностей поведения представляет собой столкновение быстрой частицы с покоящейся. Представим себе электрон, ускоренный каким-то образом до скорости, близкой к скорости света, который, проходя через вещество, сталкивается с покоящимся электроном. Поскольку обе частицы обладают одинаковой массой и поскольку обычно при таких столкновениях механическая энергия не превращается ни в какую другую форму энергии, приложимы наши рассуждения из главы I, касающиеся упругих соударений. Поэтому мы должны были бы заключить, что оба электрона после столкновения будут двигаться под прямым углом друг к другу. Но релятивистская механика с другой стороны утверждает, что оба электрона будут двигаться несколько вперед и направления их движения образуют друг с другом лишь острый угол, который становится все меньше и меньше по мере того, как скорость налетающего электрона приближается к скорости света. Позднее мы познакомимся с современной техникой, позволившей сфотографировать треки отдельных электронов. Рис. 36 представляет собой схему такой фотографии, где видно, что быстрый электрон внезапно отклонился от своего пути и из этой точки исходит трек другого электрона. Все треки

искривлены, потому что для определения скоростей электронов приложено магнитное поле. После соударения направления скоростей электронов образуют между собой весьма малый угол. Этот рисунок является схемой фотографии, полученной Ф. С. Чемпионом.

Другим ярким примером являются современные ускорители частиц, принцип действия и назначение которых мы обсудим позднее. Здесь мы имеем дело с частицами, движущимися по прямой линии или (под действием магнитного поля) по кругу, причем к ним в определенные промежутки времени прилагаются электрические импульсы.

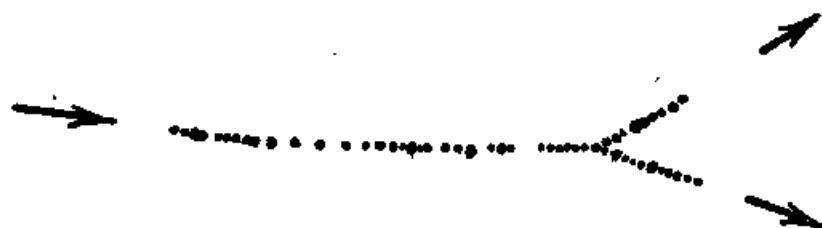


Рис. 36. След быстрого электрона, сталкивающегося с почти покоящимся.

Осуществление подобных машин зависит от возможности определять скорости частиц, чтобы можно было прилагать электрические импульсы в момент, когда частицы проходят через определенную точку. В настоящее время существуют, например, машины, в которых электронам может быть сообщена энергия в 300 Мэв *). Под Мэв, или миллионном электрон-вольт, мы имеем в виду энергию, которую получит электрон, пройдя разность потенциалов в 1 миллион вольт. Энергия покоя электрона — около $\frac{1}{2}$ Мэв, и поэтому мы имеем дело с электронами, энергия которых в 600 раз превышает их энергию покоя. Простой арифметический подсчет показывает, что этому соответствует их скорость, отличающаяся от скорости света на величину, чуть большую одной миллионной. Без учета теории относительности получалось бы, что электроны такой энергии должны двигаться со скоростью, в 35 раз большей скорости света, так что спутать теории одну с другой невозможно.

*) В настоящее время в Стэнфорде (США) действует линейный ускоритель, сообщаящий электронам энергию в 600 Мэв. (Прим. ред.)

Это лишь несколько примеров из множества проверок, которым подвергалась релятивистская механика в последние годы, и этих примеров в своей совокупности достаточно, чтобы вызвать у нас такое же полное доверие к законам теории относительности для быстро движущихся частиц, какое мы имеем к ньютоновским законам в области малых энергий.

Достойно быть отмеченным одно примечательное следствие релятивистской механики, поскольку мы будем ссылаться на него в следующей главе. Если учесть полученные ранее выражения для импульса и энергии, то простое алгебраическое вычисление дает некоторую связь между обеими величинами, а именно $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$, где E обозначает полную энергию движущейся частицы, включающую ее энергию покоя mc^2 . Если для частицы с некоторым импульсом p масса покоя m столь мала, что mc пренебрежимо мало по сравнению с p , то это уравнение с хорошей точностью приводит к соотношению $E^2 = c^2 p^2$, или $E = cp$. Мы можем рассматривать предельный случай частицы, не имеющей вовсе массы покоя. Для нее последнее уравнение справедливо точно и энергия такой частицы равна произведению ее импульса на скорость света. Подобный объект всегда должен двигаться со скоростью света, каков бы ни был его импульс. Первоначальное выражение для энергии,

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}},$$

становится неприменимым, потому что

как масса покоя m , так и квадратный корень обращаются в нуль, а нуль, деленный на нуль, смысла не имеет. Однако соотношение между энергией и импульсом остается справедливым даже в этом исключительном случае. В следующей главе мы узнаем важность этого результата для свойств света.

Принцип эквивалентности

Материал, который мы охватили до сих пор в этой главе, принадлежит к так называемой «специальной» теории относительности. Перед тем как мы оставим обсуждение сущности теории относительности, нам необходимо кратко упомянуть о предмете «общей» теории

относительности, хотя мы и не сможем этого сделать со всей полнотой.

До сих пор мы заботились только о сравнении точек зрения наблюдателей, движущихся один относительно другого с постоянной скоростью. Общая теория относительности имеет дело с тем, какими будут казаться законы физики наблюдателю, испытывающему ускорение. Ясно, что в этом случае для движущегося наблюдателя внешний мир будет казаться иным. Пассажир на поезде, который набирает скорость или резко тормозит, несомненно, заметит влияние этого ускорения. Какова природа его ощущений? Мы уже обсуждали это в главе 1 и обнаружили, что согласно закону Ньютона произведение массы на ускорение равняется силе. Чтобы заставить нас двигаться вместе с ускоряющимся поездом, сиденье и пол вагона должны действовать на нас с некоторой силой. Без этой силы все предметы стремились бы двигаться равномерно и прямолинейно и поэтому приобретали бы относительно поезда ускорение в противоположном направлении. Это то же самое, как если бы в покое находился поезд, а на нас действовало силовое поле, аналогичное полю тяготения, которое тянуло бы нас назад. Действительно, в движущемся с постоянным ускорением поезде легко создается иллюзия, что вагон наклонился и поэтому наш вес тянет нас назад.

Любое ускорение дает такой же эффект, как и поле тяготения. Вообразим, что мы находимся в закрытом ящике, вроде кабины лифта, расположенном где-нибудь в пустом пространстве, вдали от Земли и других тел, так что отсутствуют силы всемирного тяготения. Тогда все предметы в этой кабине (ящике) будут свободно парить. Если мы слегка оттолкнемся ногами от пола, то это вызовет движение вверх, пока мы не ударимся о потолок. Это положение вещей нам уже знакомо из книг и кинофильмов о межпланетных путешествиях. Предположим теперь, что внезапно мы снова почувствовали свой вес и обнаружили, что предметы падают на нас. Этому мы можем дать два объяснения: или наш ящик действительно является кабиной лифта и он начал ускоряться по направлению кверху или мы можем сказать, что кабина наша все-таки находится в покое (или движется с постоянной скоростью), но мы

находимся теперь вблизи Земли или какой-нибудь другой планеты и на нас действует тяготение.

Мы не могли бы разрешить этот вопрос, даже если бы в потолке имелось маленькое окно и через него мы могли бы видеть канат, привязанный к вершине нашей кабины, и видно было бы, что он натянут. Ожидать этого можно было бы в случае любой точки зрения, как от действия ускорения, так и от поддержания на весу нашей кабины при действии сил тяготения.

Наоборот, если бы мы путешествовали в обыкновенном лифте и канат порвался, так что кабина начала свободно падать со всем своим содержимым, то мы испытывали бы чувство свободы от веса, потому что сила тяжести сообщала бы нам такое же ускорение, как и кабине, так что не требовалось бы никакой силы, чтобы поддерживать наше положение относительно кабины. Мы не могли бы сказать, падает ли в самом деле наша кабина или внезапно перестало действовать притяжение Земли (эти сомнения продолжались бы, конечно, лишь до тех пор, пока мы не ударились бы о дно шахты).

Это один из немногих пунктов, в которых обычно столь реальное воображение Жюль Верна привело его к серьезной ошибке. В его «Из пушки на Луну» пассажиры испытывают чувство потери веса только в месте, где притяжения Земли и Луны точно друг друга компенсируют. Они должны были бы испытывать это чувство во время всего пути, как только прекратил свое действие двигатель и их космический корабль перестал испытывать трение о земную атмосферу и поэтому свободно двигался в поле земного тяготения.

Мы заключаем, что ускорения не оставляют неизменными законы физики, но дают такой же эффект, как и гравитационное поле. Этот «принцип эквивалентности», являющийся важной стороной общей теории относительности, существенно зависит от факта, отмеченного уже в главе I, а именно, что веса тел точно пропорциональны их массам, так что поле тяготения сообщает им одинаковые ускорения. Общая теория относительности основывается на той точке зрения, что ускорение всех систем отсчета, к которым мы относим наши наблюдения, в действительности не только никак не отличимо на практике от

эффекта гравитационного поля, но оба они являются существенно одним и тем же и не могут быть разделены в принципе.

Это не значит, что мы могли бы расположить нашу лабораторию таким образом, чтобы целиком освободиться от всего гравитационного притяжения Земли, хотя бы, например, потому, что это потребовало бы размещения вокруг всей Земли наблюдателей в свободно падающих кабинах, и, конечно, они ударились бы вскоре о Землю, если бы не сталкивались еще до этого друг с другом. Лишь в малом участке пространства и на короткий промежуток времени мы можем наблюдать за движением предмета с точки зрения наблюдателя, для которого не существует поля тяготения.

Общая теория относительности

Если бы мы попытались таким образом построить описание природы, то, создавая свою механику в свободно падающей кабине, мы пришли бы к заключению, что пространство имеет удивительные свойства. Предположим, например, что наша кабина с большой скоростью прилетает с далеких расстояний (из глубин вселенной) и скорость столь велика, что притяжение Земли недостаточно, чтобы заставить кабину столкнуться с Землей, но лишь отклоняет ее на малый угол. На рис. 37 линия *B* соответствует пути нашей кабины. Предположим также, что поблизости, параллельно нам и с той же скоростью, движется вторая кабина *C* с другим наблюдателем. До тех пор, пока мы не приблизимся к Земле, *C* будет находиться от нас на постоянном расстоянии, но, проходя ближе к Земле, она, как это показано на рисунке, отклонится сильнее и далее будет двигаться в другом направлении, удаляясь от нас. Как наблюдатель, находящийся в кабине *C*, так и мы находимся в свободном движении и поэтому не испытываем ощущения ускорения. Согласно воззрениям теории относительности мы должны поэтому считать себя находящимися в покое. Но мы тогда обнаружим, что расстояние между нами станет внезапно увеличиваться, хотя никто из нас не начинал двигаться.

Другими словами, не предвешая вопроса о покое или движении и выбирая за ориентиры любые предметы, которые могут двигаться свободно, мы можем обнаружить присутствие гравитационного поля и поэтому наличие массивных тел где-нибудь по соседству, изучая поведение расстояний между нашими ориентирами. На этом основано описание гравитационного поля в терминах свойств пространства и времени. Чтобы провести описание более подробно, потребовалось бы слишком много математики, но я упомяну о двух выводах, следующих из этого.

Один заключается в том, что свет в гравитационном поле не распространяется по прямой линии, но испытывает отклонение. Действительно, это можно было бы вывести уже из того доказанного в специальной теории относи-



Рис. 37. Два наблюдателя, пролетающие мимо Земли.

тельности факта, что масса и энергия эквивалентны. Луч света несет энергию и, следовательно, массу, а поскольку любая масса притягивается тяжелым телом, подобным, например, Солнцу, то это же будет иметь место для светового луча. Однако, пользуясь только этим простым соображением, нельзя найти точно величину отклонения, так как сила притяжения движущегося объекта зависит от его скорости. Эта зависимость несущественна для малых скоростей, обычно встречающихся на практике, но приводит к некоторой разнице, когда скорость равна скорости света. Проходя вблизи Солнца, свет должен отклониться на величину, которую можно подсчитать. Звезда, которую нам приходится видеть вблизи края Солнца, в действительности будет казаться несколько смещенной от своего нормального положения. Конечно, обычно невозможно увидеть звезду, когда она находится вблизи от Солнца, но возможность эта представляется во время полного солнечного затмения, когда диск Солнца закрывается Луной и его лучи не делают более звезды невидимыми. Даже в этом

случае необходимы очень точные наблюдения смещения, поскольку ожидаемая величина составляет менее двух дуговых секунд, что соответствует углу, под которым видна монета в один пенни, наблюдаемая с расстояния в две мили. Тем не менее точные астрономические наблюдения позволили обнаружить подобное смещение, и хотя астрономы все еще используют каждое солнечное затмение, чтобы повысить точность своих результатов, несомненно, что такое смещение существует и приблизительно имеет величину, предсказываемую общей теорией относительности.

Другой важный вывод состоит в том, что поле тяготения должно влиять на масштаб времени, или, точнее, что часы, находящиеся вблизи очень массивной звезды, где имеется сильный отрицательный (т. е. притягивающий) гравитационный потенциал, должны казаться нам отстающими. Это также может быть проверено, поскольку свет от горячих звезд содержит излучение только определенных цветов, т. е. некоторых определенных частот, которые, как мы знаем, связаны с электрическими колебаниями атомов определенной частоты, что похоже на действие миниатюрных радиопередатчиков. Эти атомы могут рассматриваться как стандартные часы, потому что их период колебаний является внутренней характеристикой атома и не зависит от внешних обстоятельств. Теперь известно, что эти характеристические лучи от некоторых очень массивных звезд имеют не тот же самый цвет, как такие же лучи от более легких звезд, но цвет их смещен в красную сторону.

Это согласуется с предсказаниями общей теории относительности. Мы должны предположить, что с точки зрения наблюдателя на поверхности звезды атомные «часы» будут правильными, но благодаря зависимости масштаба времени от гравитационного потенциала для нас, наблюдающих с большого расстояния, часы будут казаться отстающими, частота света меньшей и цвет его смещенным в красную сторону.

Это влияние гравитационного потенциала на ход часов интересно также благодаря его связи с парадоксом, иллюстрирующим тесную связь между идеями общей и специальной теорий относительности.

Иногда возражают, что специальная теория относительности несостоятельна при предсказании замедления хода времени. Предположим, что мы и другой наблюдатель движемся друг относительно друга с большой скоростью и устанавливаем, что при встрече наши часы показывают одно и то же время. Теперь, если мы будем считать себя находящимися в покое, мы заключим, что часы другого наблюдателя должны отставать. В свою очередь он сказал бы, что должны отставать наши часы, потому что мы движемся с большой скоростью. Очевидно, это не может быть опровергнуто, если мы находимся друг от друга на большом расстоянии, поскольку мы видели, что не можем однозначно сравнивать времена наступления событий, происходящих в удаленных местах. Однако, предположив, что позднее мы снова встретим другого наблюдателя, мы сможем, сравнив часы, выяснить, какие отстали относительно других и кто в действительности находился в движении.

В рамках специальной теории относительности правильный ответ на это возражение состоит в том, что коль скоро оба наблюдателя движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, они никогда не встретятся снова. Если же они снова встретятся, то по крайней мере один из них должен или повернуть назад, или изменить направление своего движения и подвергнуться поэтому ускорению, так что он уже не может предполагать, что он все время находился в покое.

Общая теория относительности дает более полный ответ. Предположим для простоты рассуждений, что мы двигались без ускорений, в то время как другой наблюдатель, пройдя некоторое расстояние, остановился и повернул назад. Согласно общей теории относительности он может предполагать, что все время находился в покое, но в присутствии гравитационного поля. Это объяснит происхождение сил, действовавших на него (которые мы приписываем его ускорению). Как мы видели, гравитационные потенциалы влияют на ход часов, и если это последовательно применить к рассматриваемой ситуации, ответ состоит в том, что снова, с обеих точек зрения, показания обоих часов должны сравниваться таким же образом.

После этого очень неполного обсуждения мы покинем интересную область общей теории относительности. Дальнейшее ее изучение безусловно способствует полному пониманию законов природы, но наша цель — изложить здесь законы, имеющие прямое отношение к строению материи. Общая теория относительности дает важные выводы, касающиеся проблем большого масштаба, включая структуру вселенной. Возможно, что в будущем появится какое-нибудь соотношение, связывающее эти идеи и с характеристиками процессов малого масштаба, т. е. с атомными проблемами, но пока это еще не известно.

ГЛАВА 7

КВАНТЫ, ВОЛНЫ И ЧАСТИЦЫ

Гипотеза квантов. Фотоны

Главы 4 и 5 содержали изложение ряда элементарных сведений об атомах. Мы видели, что вещество построено из атомов, масса и размеры которых могут быть определены; их движением объясняется теплота, их взаимными силами — жесткость твердых тел, а соударениями их со стенками — давление газа. Мы видели, что каждый атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра в центре, окруженного легкими отрицательно заряженными электронами. Хотя эта картина объясняет в ряде случаев многие свойства вещества, мы тем не менее наталкиваемся на противоречия, наиболее существенным из которых является тот факт, что атомы всегда имеют определенные размеры и не разрушаются в результате притяжения отрицательных электронов положительными ядрами.

Мы не будем здесь приводить весь перечень подобных противоречий, потому что он слишком длинен, а также потому, что некоторые из них будут приведены позже, дабы показать, как они разрешаются с помощью принципов новой механики. Однако уже этих примеров достаточно, чтобы показать, каким образом стало ясно, что законы природы, описанные в общих чертах до сих пор, недостаточны для описания поведения атомов.

Для дальнейшего нам необходимо определить величину, характеризующую масштаб атомных явлений. Под этим мы понимаем следующее.

Рассмотрим задачу об электроном, движущемся вокруг положительного заряда под действием сил, подчиняю-

щихся закону обратных квадратов, такая частица может двигаться, например, по кругу любого выбранного нами радиуса при условии, что ее скорость такова, что центробежная сила в точности уравнивает притягивающую электрическую силу. Подобное круговое движение мы детально обсуждали в главе 1. Тот же произвол имеет место в солнечной системе. Нет такого закона механики, который устанавливал бы, что размеры орбиты, по которой Земля вращается вокруг Солнца, должны быть именно те, каковы они есть на самом деле. Были бы они в сто раз меньше или в сто раз больше — это было бы вполне возможно с точки зрения механики, только скорость Земли должна была бы быть соответственно в десять раз больше или в десять раз меньше. Для Земли ее действительное движение есть результат более ранней истории. Очень много лет назад Земля и Солнце были частями одной и той же массы, вероятно, очень горячего газа, из которого вещество собралось в большие куски. Скорость вращения этой массы газа и конкретный путь, которым конденсировалась материя, и явились теми обстоятельствами, которые определили действительное положение Земли и Солнца. Но относительно атома мы знаем, что его размеры — не случайность, связанная с его предшествующей историей. Можно многими способами выбить электроны из атома водорода и затем позволить остающемуся ядру водорода, протону, снова захватить электрон; после того как он окажется опять в своем стационарном состоянии, этот водородный атом будет неотличим от прочих.

Объяснение стало возможным только благодаря «кванту действия». Он был введен Планком как очень дерзкая гипотеза. Планк изучал излучение черного тела, которое, как мы видели в главе 5, обнаруживает некоторые черты, противоречащие законам «классической» физики; см., например, рис. 28. Гипотеза Планка позволяла объяснить величину излучения от нагретого тела и его состав по цветам.

Планк постулировал, что свет переносит свою энергию в определенных количествах, «квантах», так что энергия волны всегда должна быть равна одному или двум или любому другому целому числу таких квантов. Энергия

каждого кванта данного цвета должна быть одной и той же и пропорциональной частоте света. Для света частоты ν (т. е. для волны, в которой электрическое поле в каждой точке пространства совершает ν циклов в секунду) каждый квант поэтому имеет энергию $h\nu$, где h — новая константа, называемая планковской постоянной или квантом действия и равная приблизительно $6,5 \cdot 10^{-27}$ в метрических единицах.

Существенный пункт состоит в том, что когда атом испускает излучение некоторой определенной частоты (или цвета), то образуется один или больше таких квантов, но никогда — доля кванта.

Это правило звучит очень неоправданно, и таким оно и казалось Планку. Он пытался применять его в различных видоизменениях, чтобы по крайней мере на вид сделать его не столь жестким; и только дальнейшее развитие показало, что его действительно следует принять целиком. В некотором смысле это казалось возвратом к старой эмиссионной теории света. Если свет действительно состоит из маленьких частичек, испускаемых источником света и распространяющихся до тех пор, пока они не достигнут глаза, фотографической пластинки или какого-нибудь другого инструмента, реагирующего на свет, то в этом случае предположение, что частицы, принадлежащие свету определенного цвета, т. е. определенной частоты, должны всегда нести фиксированную энергию, не было бы лишено оснований. Световой поток этого цвета содержал бы всегда целое число таких частиц. Однако, как следовало бы тогда объяснять тот несомненный факт, что свет состоит из электромагнитных волн? Это явное противоречие придется пока оставить неразрешенным. Один из самых важных выводов современной физики, которую нам предстоит изучить, состоит в возможности примирить два противоречивых утверждения, имену, что свет состоит из волн, и в то же время свет состоит из отдельных квантов определенной энергии.

Мы отметим теперь же, что если принять смелую гипотезу Планка, то вид кривой на рис. 28, изображающей интенсивность излучения данного цвета черным телом при какой-либо температуре, вытекает из нее естественным образом. Чтобы показать это детально, потребова-

лись бы некоторые математические выкладки, однако можно, по крайней мере, видеть, что эта гипотеза изменяет результат в правильном направлении. Рассмотрим некоторую частоту ν и возьмем температуру T такую, чтобы kT было значительно меньше $h\nu$. Соображения главы 5 привели бы тогда к результату, что энергия, содержащаяся в волне, должна быть равной kT и поэтому составляет малую долю энергии одного кванта $h\nu$. Согласно гипотезе Планка это невозможно. Энергия должна быть равна либо нулю, либо целому кванту (или нескольким). Мы установили в главе 5 случайный характер теплового движения, приводящий к тому, что энергия в световой волне бывает иногда больше, иногда меньше; то это один квант, то ни одного. Но вероятность того, что это будет один квант, оказывается очень малой, так как для этого надо, чтобы случайно один или несколько атомов в излучающем нагретом теле находились в исключительно сильном движении, т. е. чтобы тепловое движение стало гораздо более сильным, чем это имеет место в среднем.

Привлекая грубую аналогию, предположим, что я веду дело, в котором среднее количество наличных денег на руках — 100 фунтов стерлингов. Тогда в среднем моя касса к концу каждого дня будет содержать 100 фунтов. Но если вместо этого я имею сейф с таким устройством, которое позволяет мне класть в него деньги только «квантами» по 1000 фунтов за раз, то большую часть времени сейф будет пустовать. Только к концу совершенно исключительного дня, когда у меня было очень много клиентов и не нужно было платить по счетам, я могу сделать вклад в сейф. Такой случай будет выпадать гораздо реже, чем раз в десять дней, и поэтому в среднем в моем сейфе будет гораздо меньше ста фунтов.

До тех пор, пока не было других свидетельств в поддержку гипотезы Планка, к ней следовало относиться с известной сдержанностью, так как в физике часто удается объяснить некоторую серию наблюдений посредством специально вводимой гипотезы, не всегда имеющей реальное значение. Однако немедленно оказалось, что есть еще два других эксперимента, которые не были ранее объяснены и которые очень хорошо укладывались в идею

Планка. Первым из них был фотоэлектрический эффект.

Если свет падает на металлическую поверхность в вакуумной стеклянной трубке, вдоль которой приложено электрическое поле, то через трубку может течь электрический ток, переносящий отрицательные заряды от освещаемой пластинки к другой. Было показано, что этот ток состоит из электронов, удаляемых из металлической пластинки действием света. Это само по себе является совершенно естественным, если вспомнить, что свет состоит из электромагнитных волн. Металл, как известно, содержит электроны, на которые должна действовать сила со стороны электрического поля волны. Если эта сила достаточно велика, она с успехом могла бы вырывать электроны из металла. Но с этой точки зрения нужно было бы ожидать, что этот так называемый фотоэлектрический эффект потребует света большой интенсивности. Если бы свет был очень слабым, то и электрическое поле, связанное с ним, было бы очень слабым, и слабых электрических сил было бы недостаточно, чтобы преодолеть силы притяжения, которые обычно удерживают электрон внутри металла. Мы могли бы также ожидать, что если увеличивать интенсивность света, то скорость, с которой выбрасываются электроны, возрастет, поскольку они вырываются большей силой. Наконец, зависимость этого эффекта от частоты света могла не быть простой, но в целом мы могли бы ожидать, что свет большей частоты должен быть менее эффективным. Если сила меняет свое направление за слишком короткий период, то прежде, чем электрон выйдет из металла, сила изменит свое направление и будет толкать его назад.

Эксперимент, однако, дал совершенно иные результаты. Прежде всего было показано, что для света данной окраски, т. е. для данной частоты света, электроны имеют разброс по скоростям вплоть до некоторого максимума, который одинаков и для слабого, и для сильного света. Если свет слабее, электронов выходит меньше. Число электронов изменяется непосредственно с интенсивностью света, т. е. если интенсивность уменьшается в десять раз, то и электронов получается в десять раз меньше, но при этом нет никакого «порога», т. е. нет

определенного минимума интенсивности, ниже которого электроны нельзя вырвать из металла. С другой стороны, имеется определенная связь с частотой света, т. е. с цветом света. Кинетическая энергия E наиболее быстрого электрона, выбиваемого из металла, может быть выражена как $E = h\nu - W$, где h — снова планковская постоянная и W — некоторое количество энергии, которое изменяется от металла к металлу, но которое для каждого металла одно и то же независимо от интенсивности и частоты используемого света. Если $h\nu$ меньше, чем W , фотоэлектрический эффект отсутствует, поскольку кинетическая энергия не может быть отрицательной.

Эйнштейн указал, что этот результат в точности совпадает с тем, что следовало бы ожидать на основе гипотезы Планка. Если свет состоит из определенных квантов, то, когда такой квант попадает на поверхность металла, он может поглотиться, т. е. выбыть из светового пучка, так что его энергия становится активной. Если это количество энергии $h\nu$ попадает на электрон, электрон может быть освобожден из металла и получит вдобавок некоторую скорость. Если W есть то количество энергии, которое необходимо, чтобы удалить электрон из металла, то ясно, что величина $h\nu - W$ должна оставаться в качестве его кинетической энергии. Если мы увеличиваем интенсивность света, тем самым мы просто изменяем число квантов, ударяющихся о поверхность металла каждую секунду, и поэтому изменяем число образующихся электронов.

Этот результат показывает, что в идее Планка есть нечто конструктивное, поскольку она автоматически приводит к правильным свойствам электронов в фотоэлектрическом эффекте. Особенно важно, что в этой связи появляется та же самая постоянная h , которая уже была определена по излучению черного тела.

Вторым экспериментом, убедительным образом продемонстрировавшим реальность содержания гипотезы световых квантов, явился эффект Комптона. Им было обнаружено, что при прохождении рентгеновских или гамма-лучей (т. е. электромагнитного излучения с длиной волны порядка атомных размеров или короче) через вещество часть излучения рассеивается, т. е. отклоняется по всевозможным направлениям. Само по себе это как раз

то, чего и следовало бы ожидать согласно старым представлениям. Электромагнитная волна действует на электроны в атомах, заставляя их быстро колебаться; такие быстро осциллирующие электрические заряды действуют как маленькие передатчики электромагнитных волн и поэтому приводят к излучению во всех направлениях. Однако мы должны были бы ожидать, что частота рассеянного излучения будет той же самой, что и частота падающего пучка. Комптон открыл, что частота рассеянного излучения всегда меньше, чем падающего. Это уменьшение частоты тем значительнее, чем больше частота падающего излучения и чем больше угол, под которым наблюдается рассеянное излучение.

Комптон дал теорию этого результата, основанную на идее Планка. Процесс рассеяния предлагалось теперь рассматривать как отклонение световых квантов в различных направлениях. Изменение направления должно также приводить к изменению импульса светового кванта, подобно тому, как это имеет место в случае механического объекта (такого, как бильярдный шар), который не может отклониться со своего прямого пути без действия силы и поэтому без другого объекта, забирающего изменение импульса первого. Если световой квант имеет энергию $h\nu$, его импульс должен быть $h\nu/c$. Это сразу следует из результата, полученного в конце главы 6. Световой квант должен двигаться, очевидно, со скоростью света и не может иметь массы покоя. Поэтому согласно главе 6 импульс такого тела равен его энергии, деленной на c . Этот же результат может быть получен также и из волновой теории. Если мы рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся в заданном направлении и переносящую некоторое количество энергии E , мы сможем вычислить величину связанного с ней импульса и опять получим E/c .

Если принять теперь, что световой квант в эффекте Комптона испытал взаимодействие с электроном внутри некоторого атома, около которого он пролетел, то следует ожидать отдачу электрона, т. е. изменение его импульса на такую величину, которая скомпенсировала бы изменение импульса светового кванта. Для количественной оценки предположим, что световой квант отклонился на прямой

угол. Такая ситуация изображена на рис. 38, где стрелка, помеченная $h\nu/c$, представляет импульс светового кванта до столкновения, стрелка, помеченная $h\nu'/c$, — после столкновения, а пунктирная стрелка p — импульс электрона после столкновения. Эти три стрелки должны образовывать треугольник, чтобы удовлетворить закону сохранения импульса. В выбранном нами примере угол между двумя первыми стрелками — прямой, поэтому по теореме Пифагора имеем: $p^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2$. Кроме

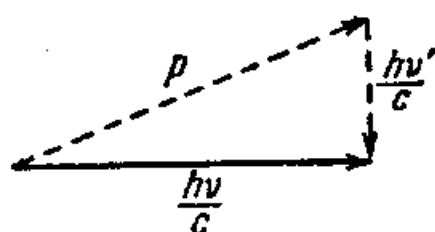


Рис. 38. Сохранение импульса при эффекте Комптона.

того, должна сохраняться также и энергия, поэтому $h\nu - h\nu'$ должно быть равно кинетической энергии электрона, которая согласно главе 6 есть разность между полной энергией $\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$ и энергией покоя mc^2 . После элементарных алгебраических операций из этих двух уравнений получается, что $\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} = \frac{h}{mc^2}$ или, вводя длину волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$, $\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}$. Другими словами, длина волны рентгеновских лучей, рассеянных под прямым углом, возрастает на величину $\frac{h}{mc}$, где m — масса покоя электрона.

Эта задача столь же легко может быть решена и для других углов рассеяния. Все результаты находятся в отличном согласии с данными наблюдений; мы видим, что гипотеза световых квантов принимает теперь еще более ощутимую форму. Мы должны представлять их себе как некоторые частицы, переносящие не только энергию, но и импульс, и способные сталкиваться с электронами, подобно тому как один электрон может сталкиваться с другими электронами. Можно наблюдать не только рассеянное излучение, но также и электроны, которые согласно нашему истолкованию должны выбрасываться при рассеянии рентгеновских или гамма-лучей. Такие электроны отдачи были обнаружены на самом деле. Измерения скоростей электронов, вылетающих в данном направлении, опять в точности совпали с предсказаниями теории.

Кванты световой энергии, существованию которых последние результаты придают очень реальную форму, часто называют также фотонами.

Мы должны констатировать, однако, что эти новые представления означают радикальный отход от более ранних представлений о свете и других излучениях. Хотя их успех в объяснении некоторых экспериментов является поразительным, все же кажется, как уже подчеркивалось, что эти представления находятся в полном противоречии с другими известными фактами, свидетельствующими о волновой природе света, в особенности с интерференцией и дифракцией световых волн.

Дифракция электронов. Стоячие волны

Отмеченная трудность свойственна не только одному свету. Подобно тому как свет, относительно которого ранее было доказано, что он представляет собой волны, в некоторых отношениях приобретает неожиданно свойства пучка частиц, было найдено, что и пучки частиц, таких как электроны, в равной мере обладают характерными свойствами волн. Наиболее поразительной демонстрацией этого служит дифракция электронов, которая была предсказана квантовой теорией до того, как была обнаружена экспериментально. Если пучок электронов, имеющих одинаковые скорости, ударяется о поверхность кристаллического вещества, то отражаемые электроны наблюдаются только в некоторых определенных направлениях. Углы максимального отражения здесь совпадают с углами, которые наблюдались бы при дифракции на том же самом кристалле рентгеновских лучей некоторой длины волны (см. гл. 4). На практике осуществить этот эксперимент несколько труднее, чем в случае рентгеновских лучей, поскольку поток электронов легче отклоняется от прямого пути случайными электрическими зарядами или веществом, через которое он проходит, так что для ясности условий эксперимент должен выполняться в вакууме и с рядом других важных предосторожностей.

Дифракция света и рентгеновских лучей была наиболее важным доказательством, убеждающим нас в их волновой природе; поэтому, если оказывается, что электроны

могут дифрагировать, то отсюда следует также, что и электроны являются волнами. Длина волны, которая может объяснить дифракционную картину для электронного пучка со скоростью v , оказывается равной $\frac{h}{p}$, где h — опять постоянная Планка и p — импульс электрона. Если скорость электрона v много меньше скорости света, мы можем выразить импульс как массу, умноженную на скорость; длина волны тогда есть $\frac{h}{mv}$.

Соотношение, согласно которому длина волны равна постоянной Планка, деленной на импульс, справедливо не только для электронов, но также и для света. В самом деле, мы видели выше, что импульс светового кванта есть $p = \frac{h\nu}{c}$, где ν — частота световой волны, к которой принадлежит квант; другими словами, длина волны λ , равная $\frac{c}{\nu}$, есть опять $\frac{h}{p}$.

Эта аналогия между электронами и фотонами явилась отправным пунктом работы де Бройля, который еще до открытия дифракции электронов предположил, что электрон может обладать волновыми свойствами. Сравнивая электроны с фотонами, де Бройль предсказал, что электронная волна должна иметь длину волны $\frac{h}{p}$.

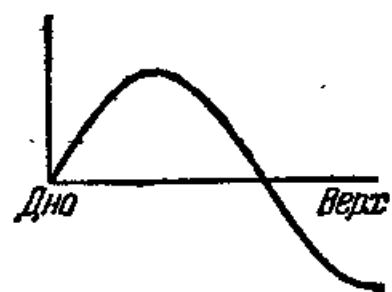
Все это не отвечает на вопрос, каким образом возможно, чтобы свет мог обнаруживать все характерные волновые свойства и в то же самое время вести себя так, как будто бы он состоит из отдельных частиц. Из явления электронной дифракции мы можем только заключить, что тот же самый парадокс существует и в случае электронов. На самом деле это справедливо для частиц или объектов любого другого типа. Поэтому мы должны искать такое объяснение, которое не было бы связано специально с природой света. Эта трудность подводит нас к одной из наиболее важных и вместе с тем наиболее трудных частей современной физики. Прежде чем мы с ней познакомимся, полезно рассмотреть некоторые дальнейшие следствия из волновой картины. Примем поэтому в данный момент тот факт, что электроны связаны

с волнами, хотя мы должны помнить, что множество вопросов в этой связи все еще остается без ответа.

Характерное свойство волны, которое будет дальше иметь для нас основное значение, состоит в том, что волна, заключенная в некоторой ограниченной части пространства, может иметь только некоторые избранные длины волн, соответствующие этому объему. Примеры тому, вероятно, наиболее знакомы из теории звуковых волн.

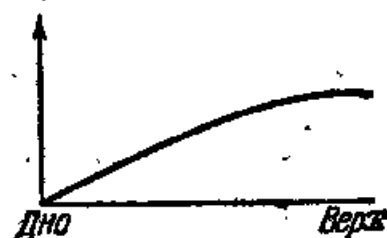
Любой музыкальный инструмент производит ноты определенной высоты тона, т. е. волны определенной частоты или длины. Органные трубы обычно закрыты со дна и открыты в верхнем конце; это позволяет воздуху в них участвовать в волновом движении, при котором он остается в покое на дне и имеет наибольшую скорость на верхнем конце, давая по этому «узел» на дне и гребень волны наверху. Иными словами, наиболее длинная из возможных волн имеет длину волны, равную четырем длинам трубы, так что вдоль трубы укладывается одна четверть волны.

Эта волна дает нижний (основной) тон органной трубы и может быть возбуждена легче всего. Это движение изображено на рис. 39. Однако возможно также волновое движение в промежуточном случае, когда длина трубы соответствует трем четвертям волны. Аналогично, могут быть пять четвертей и т. д. (в органной трубе эти более короткие волны редко образуются сами, но в большинстве духовых инструментов, например флейте, они используются для высоких нот, т. е. коротких длин волн). Другими словами, в таких случаях волны внутри инструмента принадлежат к последовательности четко определенных длин волн. Аналогично, в волновом движении скрипичной струны длина волны должна быть такая, чтобы как нижний конец струны, так и место, где находится палец скрипача, представляли собой узлы; возможные длины волн таковы,



Первая гармоника

Скорость воздуха



Основной тон

Рис. 39. Движение воздуха в органной трубе.

чтобы или половина, или одна, или одна с половиной и т. д. волн умещались между этими двумя точками.

То же самое относится к волнам другой природы. Типичный пример — волны, возникающие в ванне, где длина волны может быть, например, равна удвоенной длине ванны, так что вода поднимается на одном ее конце и опускается на другом. Если человек, сидящий в ванне, случайно двинется несколько раз назад и вперед с частотой, как раз соответствующей этой длине волны, он может возбудить эту волну до такой степени, что вода выплеснется на одном из концов через край ванны.

Если электроны — это волны, то к ним относится и все предыдущее. Представим себе электрон, заключенный в маленькой «коробке», так что он должен бегать между стенками этой коробки. В соответствии со сказанным электрон не может двигаться с совершенно произвольной скоростью, т. е. с любой длиной волны, а лишь с какой-то одной из серии четко определенных длин волн, которые будут точно соответствовать размеру коробки. Поэтому электрон должен двигаться с какой-либо одной из совокупности допустимых скоростей. Его кинетическая энергия будет тогда иметь одно из некоторых избранных значений. Возможные энергии электрона называют в этом случае уровнями энергии. Согласно волновой теории, следовательно, электрон, движущийся в ограниченной части пространства, имеет ряд строго определенных энергетических уровней.

Как мы уже отмечали в главе 4, следовало бы ожидать, что движение электрона вперед и назад в ограниченной области будет приводить к электромагнитному излучению, т. е. излучению света, и, таким образом, поскольку излучение уносит энергию, энергия электрона должна уменьшаться. Согласно классической механике период световых волн должен быть равен периоду колебаний электрона в его коробке, т. е. времени, в течение которого электрон совершает движение вдоль коробки и возвращается назад. Если электрон теряет энергию, его движение будет становиться все медленнее; время, за которое он проходит вперед и назад по коробке,

будет увеличиваться. Следовательно, в течение своего движения электрон должен был бы испустить излучение всех частот, начиная с самой высокой частоты, соответствующей началу его движения, и кончая частотой нуль. С другой стороны, согласно волновой картине электрон способен иметь только некоторые определенные энергии. Если, скажем, он начинает двигаться с энергией E_1 , то он должен терять, если только он вообще может потерять энергию, по крайней мере такое ее количество, чтобы перейти на следующий, лежащий ниже уровень, скажем, E_2 , при этом свет должен уносить энергию $E_1 - E_2$. Поскольку свет состоит из квантов, количество теряемой электроном энергии должно быть равно кванту образуемого при этом излучения. Поэтому $E_1 - E_2 = h\nu$, где ν — частота испускаемого света. Другими словами, электрон может испускать свет только частоты $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$.

После этого электрон окажется на энергетическом уровне E_2 и может продолжать терять энергию, переходя на следующий нижний уровень, скажем, E_3 , в результате чего будет испускаться свет частоты $\frac{E_2 - E_3}{h}$. Конечно, вместо этого электрон с первого уровня E_1 может также перепрыгнуть прямо на E_3 , испустив при этом свет более высокой частоты $\frac{E_1 - E_3}{h}$.

Волновая картина приводит поэтому к заключению, что излучение от такого электрона будет содержать только строго определенные частоты, каждая из которых, будучи умножена на h , представляет собой разность между двумя его энергетическими уровнями.

Обратно, электрон может приобрести энергию, поглотив свет от внешнего источника, но при этом он будет поглощать свет только избранной частоты.

Эти выводы находятся в полном соответствии с тем, что было известно в течение длительного времени о свойствах атомов. После открытия Фраунгофером резких линий, содержащихся в спектре солнечного света, физики изучили появление таких линий при излучении и поглощении света газами. Они нашли, что частоты этих линий могут быть представлены в виде разностей величин, ко-

торые являются характеристическими для каждого атома и которые, как мы теперь знаем, суть его уровни энергии, деленные на h .

Еще одно важное следствие состоит в том, что для электрона в коробке наинизший уровень энергии принадлежит длине волны, которая равна приблизительно удвоенной ширине коробки (хотя это слегка зависит от ее формы), и этой наибольшей длине волны соответствует наименьшая скорость. Если электрон имеет энергию, соответствующую этой скорости, то ясно, что он не может больше терять энергию, поскольку меньшей величины он не может иметь. Поэтому он перестает терять энергию прежде, чем он перестает двигаться. Это движение называют нулевым движением. Ясно, что мы имеем здесь дело с результатом, который прямо ведет нас к пониманию того факта, почему электроны в атомах никогда не теряют энергию настолько, чтобы упасть на ядро.

Переменная длина волны

Прежде чем мы сможем увидеть, как все эти выводы применимы к реальным атомам, мы должны освободиться от слишком искусственного представления о коробке, которая была введена только затем, чтобы представить проблему в ее наиболее простой форме. В каком смысле движение электрона под действием притягивающих сил со стороны ядра аналогично движению его в коробке?

Одно из различий между этими задачами состоит в том, что в коробке электрон движется всегда с одной и той же скоростью, изменяя направление только тогда, когда он отскакивает от стенки, в то время как мы знаем, что при движении вокруг притягивающего центра скорость электрона меняется от большей, когда он находится ближе к центру, до меньшей скорости, когда электрон от него удаляется. Мы видели в главе 1, как это связано с сохранением энергии. Полная энергия E электрона составляется из кинетической и потенциальной энергий: Когда электрон приближается к ядру, его потенциальная энергия уменьшается (в результате притяжения) и поэтому его кинетическая энергия должна возрасти. Зада-

вая полную энергию E , мы можем поэтому сказать, какая скорость и, следовательно, какая длина волны должны быть у электрона, когда он проходит через отдельную точку пространства.

Когда мы вводили потенциальную энергию в главе I, мы нашли удобным отсчитывать ее таким образом, чтобы нуль ее приходился для частицы на очень большом расстоянии от притягивающего центра. Тогда близко к центру потенциальная энергия отрицательна; это означает, что мы должны совершить работу против сил притяжения, чтобы удалить электрон от ядра.

Следовательно, полная энергия E составляется из отрицательной потенциальной энергии V и положительной кинетической энергии $E_{\text{кин}}$. Полная энергия может быть или положительной, или отрицательной, соответственно тому, какая из этих частей больше. Возьмем случай отрицательной полной энергии. Орбита электрона, вычисленная по ньютоновской механике, будет тогда замкнутой и будет проходить в малой области вблизи ядра, поскольку кинетическая энергия никогда не может быть отрицательной, и поэтому электрон не может перейти то место, где V превышает E . Отрицательная энергия поэтому соответствует замкнутой орбите, похожей на орбиты планет вокруг Солнца. Следовательно, хотя в этом случае мы не имеем дела с реальной коробкой, электрон в действительности заключен в некоторой малой области. Новым свойством задачи является, во-первых, то, что размеры области, доступной электрону, не заданы раз и навсегда, как это имеет место в случае коробки, а зависят от его энергии; во-вторых, мы имеем дело уже не со случаем постоянной длины волны, а с длиной волны, изменяющейся от места к месту.

Точный метод описания волны с переменной длиной волны дается дифференциальными уравнениями. Уравнение в частных производных, соответствующее волне, представляющей электрон в поле сил, есть уравнение Шредингера. Мы не будем здесь это уравнение выписывать, но постараемся понять его содержание и вытекающие из него следствия.

Наиболее важным результатом является то, что электрон, подобно частице в коробке, имеет ряд возможных

энергетических уровней, наинизший из которых имеет конечную энергию с волной, простирающейся на конечное расстояние от ядра.

С целью продемонстрировать пример задачи с переменной длиной волны рассмотрим простой случай, когда электрон движется только по прямой линии под действием силы, притягивающей его к фиксированной точке O на этой линии. Потенциальная энергия такого электрона выглядит примерно так, как это изображено на рис. 40,

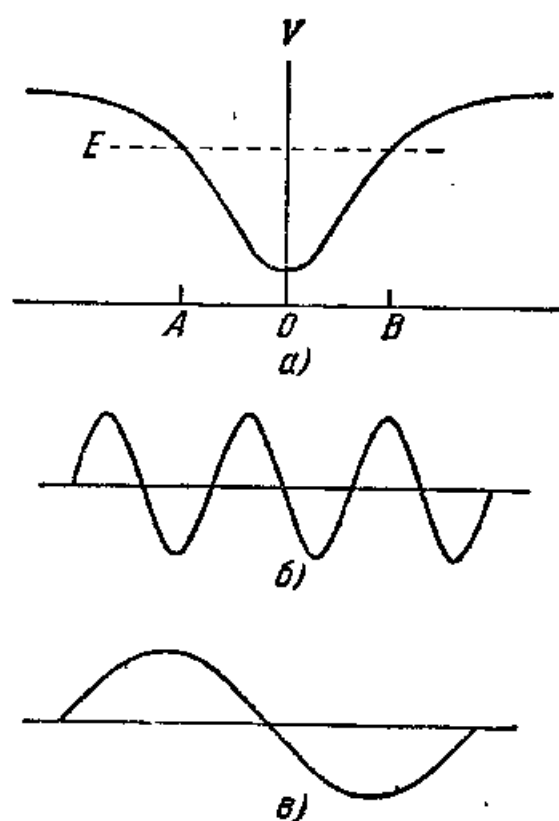


Рис. 40. Простой случай сил притяжения. a — потенциал; b — короткая волна; $в$ — длинная волна.

где она представлена в виде кривой в зависимости от расстояния x до O . Потенциальная энергия, наименьшая в O , возрастает при удалении от нее в обе стороны, поскольку, чтобы передвинуть частицу из O куда-нибудь еще, нужно приложить работу. Пусть энергия есть E (пунктирная линия на рисунке). Другими словами, E больше, чем потенциальная энергия в O , но меньше потенциальной энергии на очень больших расстояниях. С точки зрения классической механики, электрон в этой задаче может двигаться только между точками A и B , так как вне этого отрезка потенциальная энергия больше чем E , и, поскольку кинетическая энергия есть разность

$E - V$, она была бы отрицательной, что невозможно. В любой точке между A и B мы можем найти кинетическую энергию $E - V$ как высоту пунктирной линии над сплошной кривой в этой точке. Очевидно, что кинетическая энергия возрастает от A к O и затем снова убывает, пока в точке B не станет равной нулю. В волновой теории, или в «волновой механике», мы должны представить себе волну, но уже не с постоянной длиной волны, а с

переменной: короткой около O и постепенно увеличивающейся по мере того, как мы приближаемся к A или B . Ясно, что нужно несколько расширить смысл понятия «длина волны». Мы не можем теперь считать, что длина волны есть просто расстояние от одного волнового максимума до соседнего. Корректное обобщение мы получим, если заметим, что профиль короткой волны (рис. 40, б) в каждой точке очень искривлен по отношению к горизонтальной оси, тогда как для длинной волны той же высоты (рис. 40, в) профиль искривлен гораздо меньше. Волна с бесконечной длиной волны на деле представлялась бы прямой линией, которая не имеет кривизны. Мы должны ожидать поэтому, что кривая, представляющая электрон в задаче типа той, что изображена на рис. 40, а, будет очень сильно искривлена около O ; ее кривизна должна становиться все меньше и меньше по направлению к A или B ; эта кривая должна быть совсем прямой в A или B . За этими точками, где при классическом движении потенциальная энергия превышала бы полную, мы ожидаем искривления в противоположном направлении, т. е. от основной линии.

Можно думать поэтому, что волна выглядит так, как это изображено на рис. 41, а. От центра к A или B кривизна становится меньше и меньше, за точками A и B линия искривлена в противоположную сторону. Таким образом мы получим кривую, которая приближается к оси далеко от центра, так что волна на больших расстояниях пренебрежимо мала. Поэтому волна,

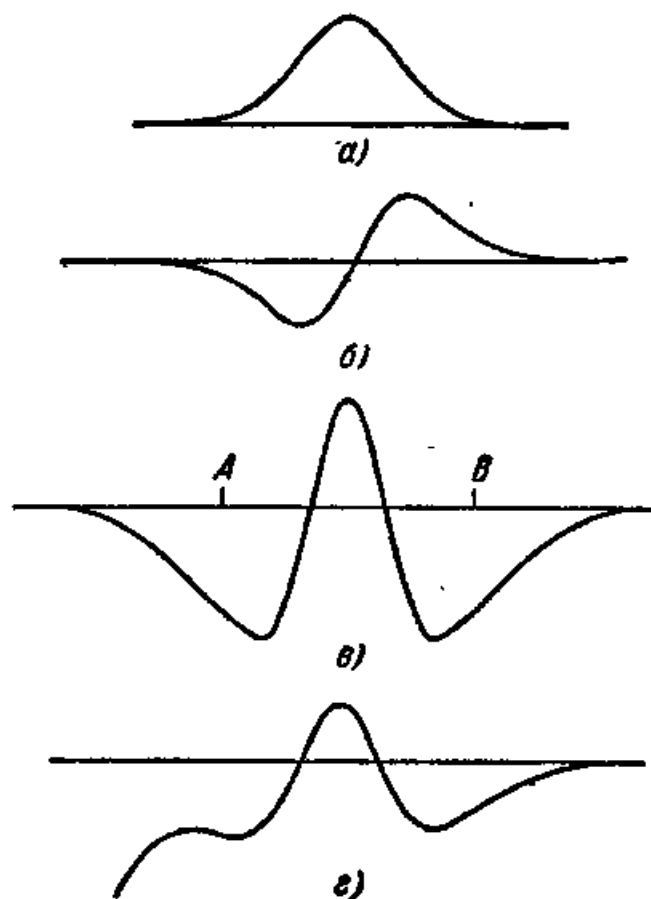


Рис. 41. а, б, в — волны, возможные для потенциала, изображенного на рис. 40; г — пример невозможной волны.

представляющая электрон, простирается теперь несколько за A и B в область, которая была бы недоступна для электрона той же энергии, движущегося согласно законам классической механики. К этому результату мы еще вернемся.

Представим себе теперь, что вместо энергии E мы возьмем несколько меньшую энергию. Тогда точки A и B сдвинутся несколько ближе друг к другу и кинетическая энергия во всей области между ними уменьшится; это означает увеличение длины волны и уменьшение кривизны волнового профиля. С другой стороны, на больших расстояниях искривление от оси X возрастает. В этом случае невозможно получить кривую, которая, как и кривая на рис. 41, a , приближалась бы к оси X по обеим сторонам. Если бы мы пытались получить такую кривую, отправляясь справа и строя ее так, чтобы она выглядела здесь аналогично рис. 41, b , мы получили бы что-нибудь вроде 41, g , где кривая слева все быстрее и быстрее удаляется от оси X , приводя таким образом к волне, имеющей бесконечную высоту на больших расстояниях, что не дает разумного решения нашей задачи.

В действительности появления кривых типа 41, g как раз и следует ожидать, если мы выбираем энергию наугад; только отдельные энергетические уровни будут соответствовать кривой типа 41, b , для которой существует разумное поведение на обоих концах. Можно доказать, что наинизший из этих уровней энергии соответствует волне без узлов, т. е. кривой вроде 41, a , которая нигде не пересекает ось. Следующий уровень имеет один узел, уровень, лежащий еще выше, — два, и т. д. Фигуры 41, a — g изображают последовательность таких функций, которые на самом деле были получены решением уравнения Шредингера для потенциала, приведенного на рис. 40, a . Существенным при этом является то, что даже первая из них, соответствующая низшему энергетическому уровню, необходимо должна иметь область, в которой ее профиль искривлен в сторону оси. В этой области энергия E волны обязательно должна быть выше, чем потенциальная энергия; другими словами, низший энергетический уровень в этой задаче расположен выше значения потенциальной энергии в самом притягивающем центре O .

Атом водорода

Мы, таким образом, видим, что электронная волна в поле притягивающих сил очень схожа с волной электрона, заключенного в коробку, при условии, что энергия электрона не столь велика, чтобы он мог выйти за пределы действия сил притяжения. Такое же положение имеет место и в реальном случае сил притяжения, действующих со стороны ядра, например ядра водорода (протона). Здесь электронная волна покрывает некоторую область пространства вокруг протона. Чтобы определить волну полностью, мы должны были бы уметь показать, где расположены ее пики и гребни во всем пространстве, а это невозможно сделать с помощью простой диаграммы вроде рис. 41. Но по аналогии с более простыми случаями нас уже не удивит следующий результат: для электрона, движущегося в водородном атоме, возможные уровни энергии есть $E = -\frac{R\hbar}{n^2}$, где \hbar — постоянная Планка, R — так называемая постоянная Ридберга, равная $R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^2}$, n может быть равно 1, 2, 3 или другому целому числу. Помимо этих уровней, для отрицательных энергий других решений не существует.

Для основного состояния, т. е. низшего энергетического уровня с $n = 1$, существует только одна волна, но уже второму уровню энергии с $n = 2$ принадлежат четыре волны различной формы, и вообще n^2 различных волн принадлежат n -му уровню. Мы вернемся позже к вопросу, чем отличаются эти волны друг от друга.

В основном состоянии, $n = 1$, электронная волна сконцентрирована вокруг протона и спадает с расстоянием; расстояние, на которое она простирается, равно приблизительно $a = \frac{\hbar^2}{4\pi me^2}$. Это составляет примерно $\frac{1}{2} \cdot 10^{-8}$ см, т. е. соответствует размерам атомов, которые были получены из приведенных в главе 4 соображений.

Таким образом, волновая механика приводит к заключению, что электрон, движущийся под действием притягивающих сил со стороны протона, имеет последовательность энергетических уровней. Электрон может изменять

свою энергию, только переходя с одного из этих уровней на другой; поэтому он может приобретать или терять энергию только в количествах, равных разности между двумя этими уровнями. Вместе с нашими знаниями о квантовой природе света это указывает на то, что свет или другое электромагнитное излучение, испускаемое или поглощаемое атомом водорода, всегда должно принадлежать к частотам, которые равны одной из этих разностей, деленных на постоянную Планка h . Это в точности согласуется с результатами наблюдений. Уже довольно давно было известно, что большинство атомов, включая водород, приводит к линейчатому спектру. При пропускании света, испускаемого очень горячим водородным газом, через спектроскоп, отделяющий разные частоты друг от друга, видны резкие линии. Обратно, исследование спектра белого света, прошедшего через объем, содержащий атомы водорода, обнаруживает темные линии на тех же местах, указывая тем самым, что часть света с этими частотами была поглощена атомами. В случае водорода формула для энергетических уровней, которая была приведена выше, дает в точности наблюдаемые положения линий.

В нашем изложении до некоторой степени мы следовали историческому развитию в обратном порядке. Было известно давно, что характеристические частоты, появляющиеся в спектрах атомов, могут быть представлены в виде разностей из серии нескольких чисел, и Нильс Бор, сопоставив это с квантовой природой света, вытекающей из теории Планка, заметил, что этот факт указывает на существование отдельных уровней энергии в атомах. Бор разработал затем квантовые правила, позволившие ему предсказать, какие орбиты из всех тех, которые могут осуществляться в ньютоновской механике, следует отождествить с уровнями энергии атома водорода. Мы не будем рассматривать эти квантовые правила детально, так как они включают более тонкие и более сложные аргументы, чем волновая механика, которая позже заняла их место. Мы отметим, что из своих квантовых правил Бор смог дать правильную формулу для последовательности энергетических уровней водородного атома. Этот успех теории и ряд других предсказаний, согласовавшихся с наблю-

дениями, не оставляли больше сомнений в том, что квантовые условия Бора были по существу правильны; тем не менее положение оставалось логически неудовлетворительным, так как эти условия были наложены на законы старой механики и попросту отбирали те из механических орбит, которые сообразовались с новыми условиями.

Поэтому, хотя некоторые выводы старой механики сохранялись, новые правила полностью изменяли самую природу проблем механики. Например, согласно старой механике энергия электрона под действием световой волны должна была бы изменяться только постепенно. Согласно же правилам Бора его энергия может быть равна только той или иной из некоторых определенных величин, так что казалось невозможным представить, как электрон переходит с одной орбиты на другую. Несмотря на подобные трудности, идеи Бора применялись к большому числу проблем и во многих случаях давали правильный ответ (хотя иногда они давали ответ неоднозначный или вообще его не давали). Такое положение существовало до тех пор, пока де Бройль не продолжил аналогию между светом и электроном, предсказав, что электроны также должны быть связаны с волной; он обнаружил, что эта картина должна приводить в некоторых случаях к стоячим волнам и, следовательно, к избранным частотам или энергиям. Эта идея была затем воспринята и развита Шредингером, который дал полное рассмотрение таких волн и показал, что оно приводит к тем же самым результатам, как и квантовые правила Бора, во всех тех случаях, где эти последние были подтверждены экспериментом. В то же время теория Шредингера предлагала определенный ответ также и в ряде тех случаев, когда правила Бора не были непосредственно применимы.

Этот путь сомкнулся с идеями, развитыми несколько раньше Гейзенбергом, работа которого более непосредственно основывалась на правилах Бора, но содержала попытку переработать их в общие механические законы и сделать их применимыми к тем задачам, в применении к которым они прежде были бесполезны. Было показано, что идеи Гейзенберга совпадали по существу с идеями Шредингера, отличаясь от них только формули-

ровкой; я изложил здесь эти результаты в форме Шредингера, так как в этом виде они легче поддаются объяснению без языка математики.

Вскоре после этого гипотеза электронных волн была непосредственно подтверждена: Томпсон и независимо от него Дэвисон и Джермер открыли дифракцию электронов, которая нами была взята в качестве отправного пункта для объяснения наших современных представлений.

Частицы и волны

Наши сведения об электронных волнах и их поведении в поле сил составляют ряд определенных законов, заключающихся в волновом уравнении Шредингера. Для электронных волн оно играет ту же самую роль, что и законы Максвелла для электромагнитных волн или света. Но при всем этом остается неразрешенным парадокс, который нас беспокоил уже несколько раньше в этой главе, а именно: электрон обнаруживает иногда характерное поведение волн, как в дифракции или в острых резонансах водородного атома, а иногда — характерные свойства частиц, проявляющиеся в том, что когда мы наблюдаем электроны, мы всегда видим один целый электрон, или несколько, или ни одного, но никогда — половину электрона. Это ставит электрон на одну доску со световым квантом, относительно которого мы также нашли, что он имеет как природу волны, так и природу частицы. В чем связь между этими двумя аспектами, как мы можем примирить эти два свойства?

Чтобы уяснить это себе, рассмотрим некоторый процесс, включающий распространение света. Мы используем здесь термин «свет» для краткости выражения, однако несущественно, подразумеваем ли мы действительно видимый свет или любой другой сорт электромагнитного излучения, от радиоволн до рентгеновских или гамма-лучей. Например, предположим, как на рис. 42, что свет от находящегося в *A* источника, такого как лампа или пламя натрия, попадает на дифракционную решетку *C* и регистрируется на фотографической пластинке *P*. Если длина волны выбрана подходящим образом, то, как мы знаем, следует ожидать, что на пластинке будут найдены

темные и светлые полосы, как это было описано в главе 3; они схематически изображены на рисунке несколько ниже *P*.

Мы видели в главах 2 и 3, как возникновение такой дифракционной картины следует из законов, управляющих электромагнитными волнами. Фотографическая пластинка реагирует на электрическое поле; черные линии получаются там, где пластинка испытала воздействие света, и представляют собой места, где электрическое поле сильнее. Почернение пластинки (так же, как и реакция наших глаз) зависит от квадрата напряженности электрического поля E , а эта величина, как мы видели в главе 2, есть также мера плотности электрической энергии.

Мы знаем теперь из квантовой теории, что световая волна состоит из световых квантов, фотонов; почернение пластинки является поэтому результатом действия большого числа фотонов. Мы можем быть уверены, что эти фотоны не влияют друг на друга во время пути. Это следует из того, что уже для умеренно ярких источников света число квантов, проходящих в некоторый заданный момент внутри определенного объема, не очень велико (на расстоянии 1 м от одноваттного источника света имеется только 1000 фотонов на каждый кубический сантиметр). Поэтому в среднем их взаимные расстояния друг от друга (в атомной шкале) должны быть очень большими. Это согласуется с тем наблюдаемым фактом, что дифракционная картина не изменяется, если мы уменьшаем яркость света, при условии, что фотографическая пластинка экспонируется соответственно более продолжительное время. Что мы увидели бы, сделав источник света настолько слабым, чтобы регистрировать фактически прохождение отдельного фотона? Он может дать нам только одну темную метку на пластинке. Если мы повторяем это достаточно часто, все эти черные метки соединятся вместе в дифракционную картину, предсказываемую волновой теорией.

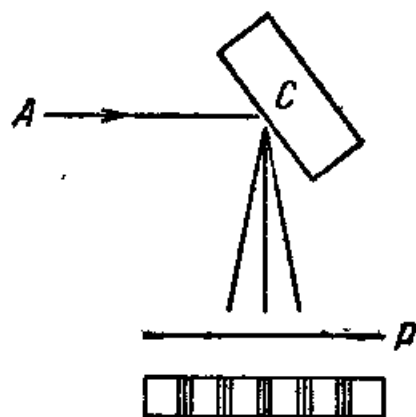


Рис. 42. Дифракция.

Можно сравнить это положение со стрельбой искусного стрелка по далекой мишени. Каждый выстрел оставляет маленькую метку на мишени. Они не всегда появляются в одном и том же месте из-за ошибки при прицеливании, неточности винтовки, заряда и действия ветра на пулю. Для каждого отдельного выстрела нельзя предсказать, куда в точности попадет пуля, но мы знаем, что много выстрелов приведут к картине, которая, если только стрелок знает свое дело, будет наиболее плотной около центра с несколькими попаданиями по краю мишени. Мы говорим, что каждый выстрел имеет большую вероятность попасть около центра.

Точно так же можно сказать, что для отдельного фотона дифракционная картина представляет вероятность фотону сделать метку в определенном месте фотографической пластинки. Поскольку мы нашли, что почернение фотографической пластинки зависит от квадрата электрического поля, можно заключить отсюда, что квадрат электрического поля в световой волне в каждой точке определяет вероятность того, что фотон подействует в этой точке на фотографическую пластинку. Этот вывод помогает установить соотношение между волновым описанием объекта и описанием его как частицы.

Ничего нового или удивительного нет в том факте, что при изучении распространения фотонов нам приходится вводить вероятности. Как при стрельбе из винтовки невозможно прицелиться и исследовать различные источники ошибок достаточно аккуратно, чтобы точно знать результат заранее, так нельзя надеяться на то, чтобы удалось проследить судьбу отдельного фотона с абсолютной точностью.

Однако такой взгляд на дифракцию кажется удивительным. При рассмотрении дифракции в главе 3 мы видели, что для того, чтобы получить волну, рассеянную на многих линиях дифракционной решетки, мы должны сложить вместе поля волн, рассеянных каждой линией. Если эти поля действуют в противоположных направлениях, они могут уничтожить друг друга, что было существенно в построении дифракционных линий. Другими словами, если в некотором месте E_1 — электрическое поле волны, рассеянной на одной из линий, а E_2 — поле волны,

рассеянной на другой, то суммарное поле есть $E_1 + E_2$. Электрическая энергия составной волны равна поэтому $(E_1 + E_2)^2$, т. е. $E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2$, и поэтому совершенно отлична от того, что мы получили бы при сложении эффектов от двух отдельных волн, которые дали бы $E_1^2 + E_2^2$. В промежутках между двумя интерференционными линиями E_1 и E_2 могут быть достаточно велики каждая в отдельности, но одна из них положительна, другая отрицательна, так что они гасят друг друга.

Эта возможность взаимного гашения из-за интерференции не имеет аналога в классической механике частиц. Если пуля из ружья может достичь мишени двумя путями, скажем, либо непосредственно, либо после рикошета о камень, то число пуль, попадающих в любую часть мишени, может быть получено подсчетом пуль, пришедших непосредственно (пусть даже камня при этом не было), и добавлением тех, что отскочили от камня (прямой путь при этом мог бы быть закрыт). Было бы абсурдным ожидать, что можно уменьшить число пуль, попадающих в какую-либо часть мишени, открывая оба пути сразу. Тем не менее это как раз то, что происходит при образовании интерференционной картины.

Новым и непривычным в квантовой теории является, таким образом, то, что вероятности появляются непосредственно в фундаментальных законах, а не как результат просто недостатка нашего знания механических деталей; вероятности различных возможных событий не всегда складываются так просто, как мы к этому привыкли.

В случае электронов существует такое же соотношение между корпускулярным и волновым описаниями. Отдельный электрон неделим, и если мы наблюдаем за ним, мы всегда находим его в некоторой точке, хотя и нельзя предсказать, где именно он окажется. Все, что мы можем получить из изучения электронных волн, заключено в вероятности нахождения электрона в любом данном месте. Поскольку дифракционная картина, которую мы наблюдаем в случае дифракции электронов, совершенно аналогична той, что обнаруживается в дифракции света или рентгеновских лучей, то вероятность опять должна быть квадратом величины, которая может быть как положительной, так и отрицательной для возможности интерфе-

ренции. Эта величина, которая для электронов играет ту же самую роль, что и магнитное или электрическое поле для фотонов, называется волновой амплитудой (или, в более математических терминах, волновой функцией) и обычно обозначается греческой буквой ψ («пси»). Эта амплитуда есть как раз то, что мы изображали на рис. 40 и 41. Вероятность, что электрон окажется в некоторой точке, равна квадрату волновой амплитуды в этой точке. Например, для электрона, движущегося в притягивающем поле сил (рис. 40), вероятнее всего обнару-

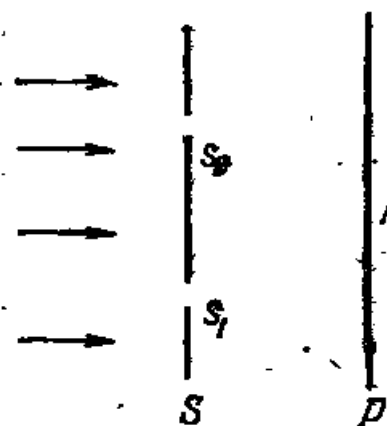


Рис. 43. Интерференция от двух щелей.

жить его вблизи центра (если его энергия равна энергии наименьшего уровня, что соответствует рис. 41, а). Если электрон расположен на втором уровне, соответственно рис. 41, б, вероятность нахождения его вблизи центра мала (волновая амплитуда проходит через нуль), но возрастает по обеим сторонам, отступя от центра, и т. д.

Тот факт, что вероятности входят в основные законы и не происходят от недостатка нашего знания деталей, иллюстрируется, например, рассмотрением простого случая интерференции, показанного на рис. 43:

Пучок электронов падает слева на экран S , способный задерживать электроны, но в котором имеются две щели — s_1 и s_2 . Сзади экрана снова находится фотопластинка P , на которой мы опять наблюдаем дифракционную картину, обусловленную интерференцией волн, прошедших через обе щели. Рассмотрим, в частности, на пластинке точку p_1 , в которой расположен дифракционный минимум, т. е. в которой нет электронов. Если бы можно было использовать «классическую» механику главы 1, то следовало бы полагать, что электрон, прежде чем попасть на пластинку, должен был пройти либо через щель s_1 , либо через s_2 . Закрыв, скажем, s_1 , мы остановили бы электроны, которые должны были пройти через нее, но это никак не сказалось бы на электронах, проходящих через s_2 . Предположим поэтому, что мы повторяем

наш эксперимент сначала с закрытой s_1 и открытой s_2 , а затем с тем же самым электронным пучком и для такого же отрезка времени с открытой s_1 и закрытой s_2 . По обычным представлениям механики мы должны были бы получить тот же самый результат, как если бы проделали все это однажды, но с s_1 и s_2 , открытыми одновременно. В действительности же результаты получаются разные. Если открыта только одна щель, безразлично какая, электроны смогут достичь точки p_1 ; в каждом отдельном эксперименте на фотографической пластинке появляется почернение в p_1 . Но при двух щелях, открытых одновременно, электроны в этой точке отсутствуют. Это рассуждение показывает, что объяснить вероятностный характер утверждений квантовой механики применением вероятностных законов к каким-то видам обычных механических движений не удастся. Утверждение, что общая вероятность электрону попасть в p_1 через две открытые щели есть нуль, представляет собой один из основных фактов, свойственных исключительно новой ситуации.

Дойдя до этого пункта, читатель, возможно, возразит, что если закрывание одной щели портит дифракционную картину, то мы могли бы попробовать действовать и не столь грубо. Могли бы найтись и другие способы определения того, проходит ли электрон через одну или другую щель, не оказывающие воздействия на его движение. Если бы мы имели достаточно мощный микроскоп, мы могли бы наблюдать за прохождением отдельного электрона через экран и видеть, через какую именно щель он проходит. Было бы очень удивительным, если бы на судьбу всех электронов, прошедших через щель s_1 , оказывало влияние присутствие или отсутствие другой щели.

Осуществить это кажется легким делом с точки зрения масштаба нашей повседневной жизни, однако это трудно сделать при атомных масштабах, трудно не только по техническим причинам, но и по причинам принципиальным. Говоря о свете, мы уже неоднократно подчеркивали, что из-за волновой природы света мы можем «видеть» какой-нибудь предмет обычным образом только в том случае, если можно считать длину волны света пренебрежимо малой; в микроскоп с таким увеличением, чтобы он делал объекты, меньшие длинны волны света,

видимыми глазу, они будут казаться из-за дифракционных эффектов маленькими шариками размером порядка длины волны. Это означает, что для нашей цели необходимо выбрать «свет» с длиной волны, меньшей, чем расстояние между щелями s_1 и s_2 , чтобы отличить электроны, проходящие около одной и около другой. Но это расстояние должно также быть сравнимо с длиной волны электрона, чтобы привести к дифракционным эффектам, о которых идет речь; для практически интересных скоростей электронов это означает «видеть» электроны посредством рентгеновских лучей или гамма-лучей. В этой области, однако, существенна квантовая природа света. Мы можем видеть некоторый предмет только тогда, когда свет отклоняется им в наш глаз или в другой инструмент, поэтому по крайней мере один световой квант должен быть отклонен электроном от своего пути. Но при этом и сам электрон также отклонится, т. е. из-за эффекта Комптона изменится его скорость, а это изменит его длину волны в достаточной степени, чтобы разрушить дифракционный эффект. Конечно, это не единственный возможный метод, с помощью которого мы могли бы попытаться обнаружить, через какую щель проходит электрон. Можно обсуждать и другие способы, но всюду появляются квантовые эффекты аналогичного типа, и ответ поэтому всегда оказывается тем же самым: мы не можем решить, через какую щель проходит электрон, без того, чтобы не нарушить его движение и тем самым не разрушить дифракционную картину на фотографической пластинке.

Подводя итоги, можно сказать, что при получении дифракционной картины существенно, чтобы электрон не подвергался воздействиям, а без этого мы не можем определить, через какую именно из двух щелей он проходит.

С точки зрения старой механики казалось разумным следующее доказательство: если электрон проходит через s_1 , мы можем вычислить возможный путь; если он проходит через s_2 , мы имеем другие возможные движения. Чтобы получить общий результат, следует сложить почернение фотографической пластинки от электронов, прошедших по одному пути, с почернением от электронов, прошедших по другому. В волновой механике эта аргу-

ментация отпадает, поскольку очень существенно, чтобы мы не производили каких-либо наблюдений, позволивших бы нам определить, где электрон прошел через экран. Ответ на вопрос, через какую щель прошел электрон, не может поэтому быть получен посредством какого-либо реального физического наблюдения.

Освоиться с аргументами такого рода, конечно, не легко, поскольку они очень далеки от всего того, к чему мы привыкли, имея дело с движением предметов больших размеров, предметов, которые мы можем видеть или ощущать непосредственно. Наблюдая за игрой в теннис, мы можем видеть, как теннисный мяч описывает при полете дугу в воздухе. При стрельбе из винтовки по мишени мы, конечно, не можем видеть пули, но, тем не менее, мы привыкли представлять себе ее движущейся по аналогичной дуге (только менее искривленной) и гораздо быстрее; так как высокоскоростная фотокамера или другой прибор может подтвердить это, мы убеждаемся в справедливости перенесения наших представлений с видимого теннисного мяча на невидимую в полете пулю. Отсюда возникает тенденция обобщить их на все объекты, хотя это и означает применение данных нашего опыта к движениям в масштабах, во много миллионов раз меньших, и к объектам с массой в 10^{27} раз меньшей, чем масса пули. Не следует удивляться, если столь далеко за пределами нашего практического опыта мы встречаемся в ряде случаев с новой ситуацией.

Принцип неопределенности

Эта проблема впервые заставляет нас обратиться к «принципу неопределенности», который был сформулирован Гейзенбергом и разработан далее Бором. Этот принцип гласит, что существует некоторый предел точности, с которой мы можем изучать движение малых объектов. В каждый данный момент определить местоположение объекта возможно. Предположим, мы производим наблюдение, которое локализует объект внутри некоторой области с размерами d . Принципиально можно сделать d как угодно малым, т. е. локализовать частицу с любой нужной нам степенью точности, используя «микроскоп»,

который действует со «световыми» волнами достаточно малой длины волны. Но при этом мы, по необходимости, должны подвергнуть наш объект столкновению со световым квантом, изменяющим его импульс на величину до $\frac{h}{d}$, где h — постоянная Планка. Это изменение тем больше, чем меньше d . Поэтому, даже если бы импульс частицы был перед этим известен точно, он будет теперь известен с точностью до величины $\frac{h}{d}$, а скорость (если теория относительности здесь не существенна) — с точностью до $\frac{h}{md}$, где m — масса частицы. Если же мы знали бы вначале место, где локализована частица, и производили наблюдение с целью определить с большой точностью ее скорость, то это наблюдение необходимо должно было бы включать вмешательство в движение частицы, так что ее положение в конце будет неопределенным, с точностью до соответствующей величины.

Принцип неопределенности утверждает, что вообще невозможно как-либо установить местонахождение частицы внутри области размером d и в то же самое время определить ее импульс с возможной ошибкой, меньшей $\frac{h}{d}$.

Принцип неопределенности ограничивает возможности нашего знания состояния движения частицы как раз такой информацией, какая может быть выражена в волновых терминах. Дискуссия по поводу волновых пакетов в конце главы 3 полностью относится к данному случаю. Волновой пакет вроде того, что изображен на рис. 24, *a*, занимает ограниченную часть пространства: так как квадрат волновой амплитуды определяет вероятность, это означает, что частица обязательно находится внутри малой области с размерами l . В то же время волновой пакет есть смесь волн с различными длинами волн, соответствующими различным скоростям частицы; относительно импульса частицы мы поэтому знаем, что он заключен в пределах между $\frac{h}{\lambda_1}$ и $\frac{h}{\lambda_2}$, где λ_1 и λ_2 — наибольшая и наименьшая длины волн соответственно. Мы видели в главе 3, что такой волновой пакет может быть по-

строен только в том случае, если величина $l \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$ по крайней мере порядка единицы. Вспоминая, что $\frac{h}{\lambda}$ есть импульс, мы снова приходим к принципу неопределенности.

Отсюда следует, что строго определенная орбита для какой бы то ни было частицы, например электрона, никогда не может быть физической реальностью. Если бы мы пытались наблюдать за положением электрона с идеальной точностью, это привело бы к полной неопределенности в его импульсе и поэтому к полной неопределенности того, где он окажется моментом позже или даже в каком направлении он движется. Это утверждение должно быть применимо к любому объекту, даже к теннисному мячу, но, конечно, мы никогда не стали бы пытаться установить местоположение теннисного мяча с такой чрезвычайной точностью. Даже если бы мы знали его положение, скажем, с точностью до одной миллионной сантиметра (чего мы никогда не смогли бы сделать) и его скорость до одной миллионной доли сантиметра в секунду (что также неосуществимо), общая точность все еще оставляла бы чудовищный запас по сравнению с принципом неопределенности. Поэтому мы можем говорить здесь об орбите, не беспокоясь о какой-нибудь неоднозначности. Для такой легкой частицы, как электрон, и для атомных расстояний положение, однако, другое. Если мы локализуем электрон внутри одного атома, т. е. примерно на расстояниях 10^{-8} см, то соответствующая неопределенность в его скорости — около 10^8 см/сек, что составляет примерно величину нормальной скорости атомного электрона. Фиксируя хотя бы приблизительно одну точку атомной орбиты, мы тем самым возмущаем движение достаточно, чтобы заметно изменить орбиту. Действительно, можно показать, что для того, чтобы различить по местоположению и скорости две орбиты, которые имеют энергии, соответствующие двум соседним уровням, потребовалась бы точность, которая не допускается принципом неопределенности.

Благодаря этому снимается трудность, с которой мы столкнулись, когда пытались понять, каким образом при

поглощении или испускании света электрон переходит из одного состояния в другое и как следует изображать его движение в этот промежуточный период. Ответ, который мы теперь можем дать на этот вопрос, состоит в том, что мы можем рисовать себе это движение так, как нам нравится, — любая такая картина была бы чистой фантазией, поскольку никаких способов наблюдения деталей движения за этот период не существует. Любое наблюдение орбиты с точностью, достаточной, чтобы отличить один квантовый уровень от следующего, должно было бы привести к грубому вмешательству в сам процесс.

Мы видим поэтому, что противоречие, беспокоившее нас в попытках примирить волновой и корпускулярный аспекты для света и вещества, возникает всегда, когда мы пытаемся ответить на вопрос, ответ на который не может быть получен с помощью какого-либо наблюдения, не противоречащего само по себе законам квантовой теории. Трудности оставались бы, если бы мы продолжали настаивать на таком, например, вопросе, как «действительно» ли в явлении дифракции электронов (рис. 43) электроны проходят через ту или другую щель. Уверенность в том, что на такой вопрос обязательно должен существовать разумный ответ, проистекает у нас из нашего повседневного опыта, от обращения с много большими объектами, за движением которых мы можем следить визуально или другими способами, не воздействуя на их движение. Чтобы сделать непротиворечивыми законы квантовой теории, важно принять тот факт, что подобный вопрос не может иметь объективного ответа, аналогично тому, как из теории относительности мы знаем, что не существует объективного ответа на вопрос, которое из двух удаленных событий произошло раньше.

Одно из следствий принципа неопределенности состоит в изменении нашего взгляда на закон причинности. Под законом причинности обычно подразумевают то утверждение, что законы физики полностью определяют судьбу физической системы при условии, что вся относящаяся к делу информация о системе известна в некоторый определенный момент времени. Как мы видели в главе 1, это несомненно справедливо для любой чисто механической системы. Если в солнечной системе, например, мы наблю-

даем в какой-то день положения и скорости всех планет относительно Солнца с идеальной точностью, мы в состоянии вычислить их полное движение во все последующие и предшествующие времена. На самом деле, в этом примере астрономы, хотя и не достигают идеальной точности, могут вычислить положения планет на очень долгий период. То же самое справедливо в отношении законов электричества. Пусть мы знаем в некоторый момент точное состояние электромагнитного поля и движение любых находящихся в нем зарядов; тогда уравнения Максвелла, изложенные в главе 2, позволили бы нам предсказать их дальнейшую судьбу. Квантовая теория не отрицает утверждения, что можно найти поведение наших атомов или других механических систем, если нам дана вся информация в один определенный момент времени, но она делает его полностью бессмысленным, поскольку условия, которые при этом предполагаются, никогда не могут встретиться; мы никогда не можем знать состояние системы с точностью, большей, чем это допускается принципом неопределенности.

Это не означает, что законы физики в квантовой теории стали менее определенными или менее абсолютными. Это означает просто, что информация, к которой относятся эти законы, имеет другую природу. В некоторых случаях они еще допускают некоторые наблюдения над отдельными частицами, результаты которых могут быть предсказаны с определенностью. Это всегда так, когда мы имеем дело с законами сохранения. Например, если механическая система изолирована и оберегается от взаимодействий с другими объектами, а также от испускания излучения, ее энергия остается постоянной. Если поэтому мы наблюдали ее энергию в некоторый момент и нашли систему на одном из возможных энергетических уровней, а затем проделали измерение энергии в следующий момент времени, мы можем быть уверены, что найдем систему на том же уровне. Но вообще мы интересуемся только вероятностью, и поэтому электронная волна дает нам вероятность, с которой электрон может быть обнаружен в любой части пространства. Это является тем не менее точным утверждением, поскольку можно воспроизводить то же самое состояние электрона много раз;

если мы каждый раз определяем положение электрона и записываем результат, то число раз, когда электрон был найден в том или ином месте, будет после многих наблюдений в точности соответствовать тому, что предсказывается электронной волной. Необходимо не одно, а множество наблюдений для того, чтобы проверить законы квантовой теории, и в этом отношении они подобны законам кинетической теории теплоты, хотя и имеют другое происхождение.

В принципе законы квантовой теории применимы ко всем объектам, как угодно большим, но, как уже подчеркивалось, поправки к старой механике Ньютона совершенно не существенны, если мы имеем дело с большими объектами. Говоря иначе, можно осуществить волновой пакет, достаточно малый, чтобы пренебречь его размерами, но который еще будет состоять из волн с достаточно близкими длинами, чтобы двигаться с единой скоростью, не расплываясь. Мы видели в главе 3, что в случае световых волн, если рассматривать только расстояния, много большие длины волны, можно считать световые пучки и световые сигналы распространяющимися по определенному пути; это приближение было названо геометрической оптикой. Мы видим поэтому, что старая механика Ньютона выступает в том же отношении к волновой механике, как геометрическая оптика к волновой оптике. Из-за этой аналогии одно время на самом деле считали, что электронные волны можно рассматривать как физическую реальность, как будто электрон — это то же самое, что волновой пакет. Однако небольшое размышление показывает, что это не так. В условиях, когда применима геометрическая оптика, волновые пакеты будут передвигаться как маленькие частицы по определенным орбитам, или траекториям. Но тот факт, что они имеют определенные размеры, хотя и малые, и то, что они содержат набор различных длин волн, как бы мало они ни отличались друг от друга, означает, что по истечении достаточно длительного времени такой пакет расползется, и поэтому, если материальная частица, такая, как электрон, в действительности состоит из такого резко ограниченного волнового пакета, то после некоторого времени эта волна должна была бы расплыться.

Экспериментально мы могли бы тогда отрезать одну половину электрона от другой, в полном противоречии с действительными свойствами. Следовательно, мы вынуждены остаться на той точке зрения, что волны определяют только вероятности и поэтому распывание волнового пакета означает не то, что распывается электрон, а просто то, что наши сведения о том, где он находится, становятся менее определенными. Это и не удивительно, поскольку по истечении длительного времени неизбежно скажется некоторая неопределенность в его начальном местонахождении и скорости.

До сих пор мы обсуждали принцип неопределенности только в связи с возможными измерениями положения и скорости частицы. Это не единственные измерения, которые можно делать; другие измерения дают ответы на другие вопросы о движении частиц. Весьма важным является измерение энергии частицы, движущейся в заданном поле сил, например электрона в атоме водорода. В ньютоновской механике можно представить себе, что мы измерили положение и скорость частицы, после чего по положению можно вычислить потенциальную энергию, по скорости — кинетическую энергию и сложить их вместе. В квантовой механике, мы знаем, это никогда не приведет нас к точному результату для энергии, поскольку наши сведения либо о положении частицы, либо о ее скорости обязательно будут неточными. Однако мы можем определить энергию также и непосредственно. Например, так как мы знаем уровни энергии атома водорода и частоты излучения, испускаемого при переходе электрона с одного уровня на другой, можно рассмотреть атом, только что испустивший фотон, соответствующий разности энергий между уровнями $n = 2$ и $n = 1$, т. е. между основным состоянием и первым возбужденным. Мы можем произвести наблюдение над фотоном, пропуская его через призму, и определить его длину волны и частоту. Мы знаем, кроме того, что атом совершил переход со своего первого возбужденного состояния в основное и поэтому, если постараемся предохранить его от дальнейших возмущающих влияний, он будет находиться, безусловно, на своем нижнем уровне, энергия которого известна.

В этой ситуации принцип неопределенности также накладывает некоторое ограничение, которое может быть сформулировано как условие, чтобы произведение ϵt всегда было больше постоянной Планка h ; причем ϵ есть предел неточности наших сведений об энергии, t — отрезок времени, смысл которого сейчас будет разъяснен. Иногда говорят, что t в этом правиле есть неопределенность нашего знания того момента времени, к которому относится наблюдение. Другими словами, основная мысль состоит в том, что хотя мы знаем, что в некоторый момент частица обладает определенной энергией, но мы не знаем, когда именно это имеет место; эта неопределенность должна бы быть тем больше, чем точнее определена энергия. Эта интерпретация, однако, некорректна, как можно сразу видеть из нашего примера с атомом водорода, находящимся в основном состоянии. Здесь мы нашли энергию точно, т. е. возможная ошибка ϵ чрезвычайно мала, и все же, так как атом будет оставаться в этом состоянии как угодно долго, пока нет возмущающих воздействий, в любой последующий момент времени можно утверждать, что его энергия известна.

Имеются, в действительности, две корректные интерпретации этого правила. Первая из них состоит в следующем: если частица (или атом) изменяет энергию под действием внешних причин или испуская квант излучения и если поэтому ее энергия остается постоянной только в течение времени t , то энергия в этом случае определяется с точностью до такой величины ϵ , чтобы ϵt было больше h . В этой форме правило приложимо к водородному атому. Энергия основного состояния определяется точно, потому что здесь атом, если он не подвергается внешним воздействиям, будет сохранять ту же самую энергию до бесконечности. Но в любом возбужденном состоянии атом имеет возможность испустить свет и будет поэтому оставаться в этом состоянии только ограниченное время. Мы не можем точно предсказать продолжительность этого периода, так как здесь снова выступают законы вероятностей, но в среднем время известно. Поэтому энергия любого возбужденного состояния, или любого уровня энергии атома, исключая наинизший, не фиксирована точно, а известна с ошибкой примерно h/t , где t — среднее

время жизни возбужденного состояния, или время, по истечении которого в среднем будет испущен световой квант.

Поскольку энергия светового кванта должна быть равна разности между энергиями атома до и после испускания, она также должна быть неопределенной, и свет, наблюдаемый через спектроскоп, не должен быть абсолютно резким, а должен состоять из некоторого малого интервала частот. Из простых соображений следует, что это и должно в действительности иметь место. Пусть мы имеем большое число атомов водорода и налагаем на них некоторое возмущение, скажем, пропускаем через водородный газ интенсивный электрический разряд, который возбуждает большое число атомов до первого возбужденного состояния; при этом газ начинает светиться, испускать свет. Однако это свечение существует только в течение некоторого короткого периода, так как после некоторого отрезка времени t большинство атомов должно возвратиться в свое основное состояние и перестать излучать. Свет, который мы наблюдаем, есть поэтому волновой цуг, или волновой пакет ограниченной длительности, как на рис. 24; в главе 3 мы видели, что такой волновой цуг составлен из волн, принадлежащих к целому интервалу длин волн или частот, и этот интервал частот есть как раз $\frac{1}{t}$, где t — длительность. Это как раз дает правильный разброс по энергиям соответствующих фотонов. Спектральные линии в действительности всегда имеют ширину. В идеальном эксперименте, где исключались бы другие возмущающие влияния, должна была бы наблюдаться «естественная ширина» линии, величина которой соответствует изложенным соображениям.

Правило, согласно которому произведение Δt не может быть меньше h , может быть истолковано также по другому. Рассмотрим электрон, движущийся в атоме водорода по очень большой орбите, так что его можно описывать с помощью волнового пакета, протяженность которого гораздо меньше радиуса орбиты, и пусть разброс по скоростям все еще достаточно мал, чтобы пакет как целое мог двигаться по орбите, не испытывая немедленно дисперсии. В этом случае можно утверждать, что если

известна энергия с возможной ошибкой ϵ , то волновой пакет должен быть размазан по крайней мере на расстояниях vt , где v — скорость центра волнового пакета. Другими словами, момент времени, в который электрон проходил бы через любую заданную точку на орбите, не определен на величину t ; отсюда снова получается, что ϵt должно быть равно по крайней мере h . Далее, для больших орбит время обращения, т. е. время, за которое согласно классической механике электрон возвратился бы в исходное положение, равно также периоду световой волны, согласно классической физике испускаемой таким электроном. Поскольку для очень больших орбит квантовые законы совпадают с выводами классической физики (это утверждение составляет содержание «принципа соответствия», который сыграл большую историческую роль в развитии квантовых законов), то частота испускаемого света есть $\frac{1}{t}$, или энергия светового кванта $\frac{h}{t}$. Поэтому разность энергий между соседними

уровнями энергии, или энергия светового кванта, испускаемого при переходе между ними, равна приблизительно $\frac{h}{t}$, где t — период обращения. Из нашего пра-

вила следует поэтому, что положение электрона на орбите совершенно неизвестно, если энергия его известна достаточно хорошо, чтобы отличить один уровень энергии от другого. Это снова показывает нам, что мы не должны пытаться описать переход электрона с одной орбиты на другую в терминах классического движения.

Подытожим результаты настоящей главы. Мы видели, что как световой квант, так и электрон должны рассматриваться как частицы; при этом мы не можем следить за движением или поведением этих частиц от точки к точке так, как мы привыкли это делать в предыдущих главах. Вместо этого их поведение описывается волнами, из которых можно получить вероятности результатов различных наблюдений, производимых над этими частицами. Таким образом, мы нашли, что противоречия между волновыми и корпускулярными свойствами света или вещества нет, непосредственные наблюдения свидетельствуют

о наличии и тех и других свойств; в то же время мы видели, что волновая природа электронов позволяет объяснить стабильность атомов при определенных энергиях, размеры нормального атома и положение спектральных линий света, испускаемого газом или частично поглощаемого газом при прохождении света через газ. В последующих главах мы увидим, каким образом эти новые законы дают полное объяснение свойств атомов и систем атомов во всех мыслимых обстоятельствах.

Решения этих проблем мы добились ценой ограничения понятий местоположения, скорости и движения, к которым приучили нас наш повседневный опыт и несколько столетий развития классической физики; обнаружилось, что эти понятия могут быть однозначно использованы только тогда, когда они могут быть связаны с реальными наблюдениями, не противоречащими принципиально законам квантовой теории. В частности, мы вынуждены отказаться от полного причинного описания механических процессов, т. е. от какого бы то ни было знания состояния атома с такой точностью, чтобы можно было полностью предсказать его дальнейшую судьбу в том смысле, в каком астроном может предсказать положение планет на небе. Это не лишает нас возможности с определенностью предсказывать поведение тел, содержащих большие системы атомов, поскольку законы случая, связанные с квантовыми вероятностными законами, допускают такие предсказания с любой точностью, которая когда-либо нам может потребоваться, совершенно так же, как это было в случае кинетической теории, излагавшейся в главе 5.

ГЛАВА 8

СВОЙСТВА АТОМОВ

Водород и гелий

Предыдущая глава содержала набросок новых квантовых законов, к которым мы пришли, столкнувшись с рядом явных противоречий, возникавших при попытках применить известные нам законы природы к строению атома. Основные факты, которые мы использовали, — существование световых квантов, следующее из фотоэлектрического эффекта, эффекта Комптона и структуры излучения нагретого тела; волновая природа электрона (и других частиц), обнаруженная в опытах по дифракции электронов, а также тот факт, что атомы имеют определенные размеры и электроны не падают на ядра.

Не следует, однако, забывать, что все это не более как примеры, выбранные из громадного количества опытных фактов, на каждом этапе указывавших на неудачи старых законов, и что новые законы не были окончательно приняты до тех пор, пока не было показано, что они не только могут объяснять естественным образом почти все известные данные, касающиеся атомов, но и предсказывать новые особенности, которые подтверждались экспериментом.

Ценой, уплаченной нами за эту точку зрения, явился отказ от описания свойств атомов посредством той простой картины, которая основана на аналогии с движением тел гораздо большего масштаба. Мы обнаружили, что наши представления о местоположении и движении объектов были ошибочны и внушены нам нашим опытом, имеющим дело с объектами повседневной жизни. Мы приняли тот кажущийся противоречивым факт, что электрон в

некотором смысле является частицей, а в другом смысле — волной; мы нашли, что в этом еще нет реального противоречия, при условии, если мы не будем настаивать на вопросах, ответ на которые не может дать тем или иным образом никакое из возможных наблюдений или измерений.

Последняя глава излагала основные принципы новых законов.* Для краткости некоторые более частные вопросы были опущены. В настоящей главе мы дополним ими наше обсуждение, а также опишем некоторые весьма общие результаты, которые могут быть выведены из квантовых законов. Это даст нам в руки полную совокупность законов, с помощью которых можно всерьез изучать свойства атомов; в этой главе будут приведены результаты такого изучения. Станет ясно, что все свойства атомов и свойства вещества, состоящего из атомов, укладываются в общую картину, что квантовые законы охватывают эти проблемы так же полно, как старая механика описывает движения планет или механизм часов и как уравнения Максвелла для электромагнитного поля охватывают свойства электрического генератора, радиосхемы или распространение световых волн.

Для начала мы обсудим некоторые вопросы, возникающие при переходе от атома водорода, содержащего только один электрон, к большим атомам, содержащим большее число электронов. Такой переход встречает затруднения и поэтому требует ряда новых идей, о которых будет рассказано позже, но на некоторое время мы будем рассматривать задачу так, как если бы электроны не действовали друг на друга, и каждый из них двигался независимо в некотором поле сил. Точно так же мы говорим о движении Земли или какой-либо другой планеты вокруг Солнца, как будто бы существовало только Солнце и одна эта планета, забывая о существовании остальных. В механике солнечной системы основания для этого гораздо более сильные, чем в случае атома, поскольку гравитационные силы между двумя телами зависят от их масс. Так как Солнце намного тяжелее любой планеты, притяжение Земли Солнцем, например, гораздо сильнее, чем притяжение со стороны Марса или Венеры. С другой стороны, в атоме силы электрические и зависят от заряда частицы. Электрический заряд всех электронов в атоме,

вместе взятых, равен по величине (хотя и противоположен по знаку) заряду ядра. Поэтому силы, действующие на один электрон со стороны остальных, в действительности отнюдь не малы. Тем не менее будет полезным начать именно с упрощенной проблемы, чтобы ярче выделить некоторые важные обстоятельства; позже мы увидим, как можно подтвердить получаемые результаты.

Рассмотрим атом, следующий за водородом в таблице элементов. Это гелий, ядро которого несет положительный заряд, вдвое больший, чем у электрона или протона. Электрически нейтральный гелиевый атом содержит два электрона. Пренебрегая взаимодействием электронов, можно ожидать, что каждый из электронов представляется волной того типа, о котором шла речь выше. Каждая из этих волн принадлежит некоторому уровню энергии, характеризуемому квантовым числом n ; состояние с наименьшей энергией, в котором электроны связаны сильнее всего, получается, если взять для каждого из электронов наинизший уровень энергии, т. е. $n=1$. Для энергии этого уровня у водорода в предыдущей главе приводилось выражение $-\frac{2\pi^2 me^4}{h^2}$, где m — масса электрона, e — электрический заряд электрона и протона и h — постоянная Планка. Знак минус указывает на то, что энергия отрицательна, т. е. что для удаления электрона необходимо затратить работу. Появление в этой формуле e^4 связано с законом Кулона, дающим для сил величину $\frac{e^2}{r^2}$.

В гелии, где ядро имеет положительный заряд $2e$, величина сил есть $\frac{2e^2}{r^2}$, поэтому низший уровень энергии электрона вблизи ядра гелия равен $-\frac{4\pi^2 m (4e^4)}{h^2}$. Эта величина в четыре раза больше, чем у водорода. Другими словами, энергия, требуемая для удаления одного электрона из атома гелия, должна быть примерно в четыре раза больше по сравнению с водородом.

В действительности эти числа преувеличены, поскольку мы не учли отталкивания между двумя электронами. Но грубо ответ правилен; атом гелия гораздо труд-

нее лишить электрона («ионизовать» атом гелия). Например, если газообразный гелий заполняет трубку, вроде тех, что используются в рекламе, электрический ток будет протекать через нее только в том случае, если электрическое напряжение между ее концами значительно больше, чем требуется для трубки, наполненной водородом. Механизм такого разряда состоит в том, что свободные электроны ускоряются прикладываемым электрическим полем и при соударении с некоторыми из атомов могут выбить из них электрон. В результате этого остается положительный ион, который будет двигаться по направлению к отрицательному концу трубки, тогда как выбитые электроны будут стремиться к положительному концу. Приобретая достаточную скорость, они в свою очередь могут ионизовать другие атомы. Разряд может поддерживаться только в том случае, если электроны на своем пути между соударениями имеют возможность приобрести достаточно энергии, чтобы ионизовать при столкновениях новые атомы; вольтаж, при котором начинается разряд, может поэтому быть использован как мера энергии, затрачиваемой на ионизацию атома.

Мы можем также рассматривать уровни атома гелия с более высокой энергией. Из предыдущей главы известно, что свет может перевести атом на один из более высоких уровней энергии при условии, что энергия светового кванта в точности равна разности энергий между старым и новым уровнями. В простой картине, которую мы построили, все энергетические уровни электрона в гелии должны бы быть в четыре раза больше по величине, чем в случае водорода. Чтобы перевести атом гелия на более высокий уровень, или, как мы скажем, чтобы возбудить его, необходимы световые кванты примерно в четыре раза большей энергии. Поскольку энергия светового кванта равна постоянной Планка, умноженной на частоту, нам нужен свет с частотой в четыре раза большей, чем частота света, способного возбудить атом водорода. Число четыре снова оказывается преувеличением из-за отталкивания электронов, но тем не менее спектральные линии гелия, т. е. частоты света, способного возбудить газ и поэтому сильно поглощающиеся при прохождении через него, лежат гораздо дальше

в ультрафиолетовой области, т. е. в области больших частот, чем для водорода. Пока что, следовательно, наши представления находятся в хорошем согласии с фактами.

Другие легкие атомы. Принцип Паули

Однако такое объяснение не проходит, если мы пойдем дальше. Рассмотрим следующий атом, литий, имеющий ядро с положительным зарядом Ze и три электрона в нейтральном атоме. По нашей аргументации надо было бы ожидать, что электроны в литии должны быть примерно в девять раз сильнее связаны, чем в водороде, что пары лития гораздо труднее ионизовать, чем водород или гелий, и что частоты света, способного поглощаться литием, должны лежать гораздо дальше в ультрафиолетовой области, чем в случае водорода или гелия. Эти утверждения, однако, неправильны. Литий ионизовать легче, чем водород, и поэтому гораздо легче, чем гелий. Для начала электрического разряда в трубке, заполненной парами лития, достаточен очень низкий вольтаж; а если свет, пропущенный через пары лития, анализировать с помощью спектроскопа, то линии поглощения, оказывается, начинаются уже в красной части спектра, вместо того чтобы быть только в ультрафиолетовой области. В самом деле, пламя, в которое помещено некоторое количество соли лития, обнаруживает очень характерную красноватую окраску из-за испускания красных линий. Механизм здесь состоит в том, что при соударениях атомов, быстро движущихся в горячем пламени, некоторые атомы лития возбуждаются по отношению к нормальному состоянию на первый энергетический уровень; от этой дополнительной энергии атомы могут избавиться, испустив световой квант с частотой красного света.

Таким образом, атом лития не обнаруживает свойств, которых мы должны были бы ожидать, придерживаясь нашей простой картины; необходимо поэтому как-то расширить эти законы. Эта трудность связана именно с присутствием третьего электрона. Если он удален тем или иным способом, т. е. если мы рассматриваем ион лития, содержащий только два электрона вместо трех, то оказы-

вается, что его свойства согласуются с нашими ожиданиями. В частности, энергия, необходимая для того, чтобы удалить один из остающихся электронов, значительно выше той, которая требуется, чтобы выбить один электрон из нейтрального атома гелия.

Было замечено, что свойства атома лития можно удовлетворительно объяснить с помощью нашей модели, если предположить, что третий электрон занимает не уровень наименьшей энергии ($n=1$), а следующий, более высокий уровень ($n=2$). Прежде всего в уравнениях главы 7 энергия каждого уровня содержит квадрат квантового числа n в знаменателе. Другими словами, энергия уровня для $n=2$ должна составлять только одну четверть от энергии уровня $n=1$. Кроме того, радиус сферы, в которой сосредоточена электронная волна, возрастает с n как n^2 , т. е. волна для третьего электрона должна быть размазана в гораздо большей области, чем для двух первых. Поэтому третий электрон движется как бы в электрическом поле, которое образовано ядром (заряд $+3e$), окруженным первыми двумя электронами, несущими заряд $-2e$. Его свойства должны поэтому быть похожи на свойства электрона, движущегося около малого центра с одним только положительным зарядом, его энергия в этом случае приблизительно была бы равна энергии атома водорода в состоянии с $n=2$. Другими словами, энергия, необходимая, чтобы удалить последний электрон из атома лития, должна составлять только одну четверть энергии ионизации водорода. На самом деле, эта энергия равна величине между $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ от энергии ионизации водорода, но с точки зрения той грубой картины, которой мы сейчас пользуемся, такое расхождение не является удивительным.

Отсюда следует поэтому, что нормальное состояние атома лития представляется энергетическим уровнем, существование которого можно было предвидеть; однако совершенно неожиданно для нас этот уровень оказывается обязательно наинизшим. Дело выглядит таким образом, как будто последний электрон не может попасть в состояние с $n=1$, если на нем уже находятся два электрона.

Мы перейдем теперь к следующим атомам. Это атом бериллия с четырьмя электронами; имеющиеся факты

снова говорят в пользу того, что четвертый электрон, так же как и третий, может находиться только на втором уровне, т. е. $n=2$. Добавляя последовательно положительные заряды к ядрам и новые электроны так, чтобы атом был нейтральным, и рассматривая, таким образом, поочередно атомы бора, углерода, азота, кислорода, фтора и неона, мы нашли бы, что все они ведут себя так, как если бы только два из принадлежащих им электронов находились в состоянии с $n=1$, тогда как для остальных $n=2$. Вдоль этой серии атомов силы притяжения со стороны ядра становятся все сильнее и сильнее, в результате чего размеры атомов уменьшаются, поскольку волна, представляющая наружные электроны, занимает все меньшую и меньшую область, и по мере концентрации электронных волн во все более сильном поле растет энергия ионизации. Последний в этом ряду благородный газ неон трудно ионизовать. Его энергия ионизации почти так же велика, как и у гелия, и больше, чем у водорода; линии поглощения неона начинаются только в ультрафиолетовой области.

Следующий атом — натрий, ядро которого содержит одиннадцатикратный электрический заряд протона и окружено одиннадцатью электронами; ситуация, которую мы обнаружили для лития, повторяется опять. Натрий легко ионизовать, в действительности даже легче, чем литий; свойства последнего электрона со всех точек зрения позволяют считать, что он помещается теперь на третьем уровне, с $n=3$. Прослеживая всю таблицу элементов, мы нашли бы, что это положение повторяется неоднократно.

Как объяснить это поведение? Вначале полагали, что причина, почему нельзя поместить больше двух электронов на низший уровень, больше восьми на следующий и т. д., заключается в действии отталкивающих сил между электронами, но тщательное математическое исследование опровергло эту гипотезу. Если рассматривать задачу, например, о трех электронах в поле ядра лития точно, не делая никаких допущений, ответ оказывается вполне определенным: в состоянии наименьшей энергии все три электрона должны были бы иметь $n=1$, хотя сама величина энергии связи в этом состоянии несколько изменилась бы

из-за взаимного отталкивания электронов. Почему же это состояние не обнаруживается в природе?

То обстоятельство, что этот факт является новым моментом первостепенной важности, отнюдь не вытекающим из излагавшихся до сих пор квантовых законов, было понято Паули. Этот факт надо рассматривать как новое и независимое правило, которое должно быть добавлено к этим законам.

Чтобы понять его истинную природу, вспомним, как уже говорилось в главе 7, что n -му уровню энергии электрона в атоме водорода принадлежат n^2 различных электронных волн; другими словами: только одна для $n = 1$, четыре для $n = 2$, девять для $n = 3$ и т. д. Мы видели, что при построении атомов дело обстоит так, как если бы на нижнем уровне ($n = 1$) было место для двух электронов, на следующем ($n = 2$) — для восьми и т. д., иначе говоря, как если бы на каждом уровне было место для числа электронов вдвое большего, чем число возможных электронных волн. В состоянии, описываемом одной и той же волной, не может быть больше двух электронов. Можно сказать, что в одном и том же состоянии движения не бывает больше двух электронов. Другими словами, любое возможное размещение электронов, которое само по себе было бы совместимо с законами волновой механики, но которое содержит более двух электронов в одном и том же состоянии движения, должно быть исключено. В этом основное содержание предложенного Паули «принципа исключения», который теперь составляет одну из важнейших частей атомной физики.

Причина, по которой именно два электрона могут двигаться одинаковым образом, связана с новым открытием (его мы сейчас обсудим более детально), именно, открытием «спина» у электрона. Оказывается, мы должны представлять себе электрон как бы вращающимся относительно собственной оси при его движении в атоме, вроде того, как Земля, двигаясь по своей орбите вокруг Солнца, вращается относительно своей оси. Как мы увидим дальше, для любой заданной электронной волны или заданного состояния движения электрона имеются только два способа вращения. Это означает, что, например, два электрона гелия в нормальном состоянии вращаются

противоположными способами; то же самое справедливо для двух электронов, занимающих вместе любое другое состояние в более тяжелых атомах. Принцип Паули гласит поэтому, что электроны никогда не могут находиться в одном и том же состоянии, если состояние определяется движением электрона и его спином.

Как я уже подчеркивал, принцип Паули не следует из квантовых законов, это есть независимый факт. Мы найдем позже много убедительных подтверждений его правильности. В теории положительного электрона мы увидим, что принцип исключения жизненно связан с другими законами таким образом, что без него эти другие законы привели бы к непонятным и нелепым выводам.

Момент количества движения

Для понимания ряда фактов, связанных с наличием спина у электрона, а также некоторых других важных характеристик атомов мы должны прежде понять ту роль, которую играет в квантовой теории момент количества движения.

Мы встретились с понятием момента в главе I как с некоторой полезной концепцией механики, где оно характеризовало движение вокруг оси, противопоставляя его движению прямо к оси или от нее. Момент количества движения какого-либо объекта сохранялся, если движение происходило в поле центральных сил, т. е. сил, действующих по направлению к некоторому фиксированному центру, что позволяло нам очень просто получать некоторые сведения о последующем движении объекта. При взаимодействии нескольких тел между собой их полный момент количества движения не изменялся.

Переходя к обсуждению роли момента в квантовой механике, рассмотрим сначала очень простую, несколько академическую задачу; пусть электрон может двигаться только по кругу радиуса r , как бусинка, нанизанная на проволочный круг. Если трения нет, мы можем ожидать, что его кинетическая энергия будет сохраняться. Или, если ввести волну, как в последней главе, его длина волны будет постоянной. Поскольку путь электрона замкнут, то волна может существовать только в том случае, если по

длине окружности укладывается целое число, скажем m , длин волн. На рис. 44 тонкая линия проведена так, чтобы ее расстояние от круга указывало амплитуду волны.

Используя закон де Бройля, $\lambda = \frac{h}{p}$, где p — импульс электрона, получим, что $p = \frac{h}{\lambda} = m \frac{h}{2\pi r}$. Этот результат аналогичен тому, что мы получали для движения электрона

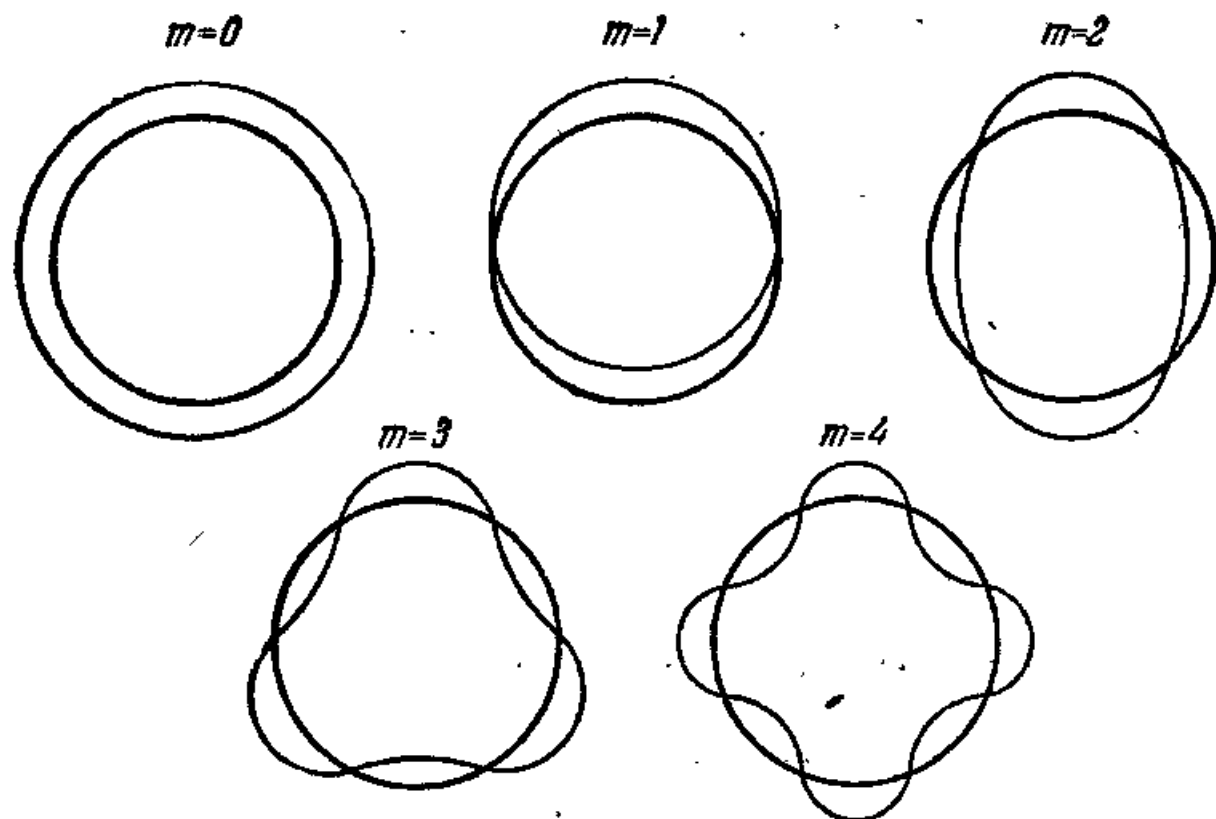


Рис. 44. Волны при движении по окружности.

в ящике, где также возможны только избранные скорости и, следовательно, только избранные энергии возможны при движении. Если $m = 0$, электрон вообще не движется; волновая амплитуда и поэтому вероятность обнаружить электрон одна и та же вдоль всего круга. Для любого другого m электрон может двигаться по кругу в любом направлении; чтобы различить эти случаи, используют положительные и отрицательные числа m .

Предположим, что круг горизонтален, и выберем вертикальную ось, проходящую через его центр. Тогда момент количества движения относительно этой оси равен согласно главе 1 расстоянию от оси r , умноженному на проекцию импульса частицы в направлении под прямым углом к этому расстоянию. В нашем случае проекция

есть полный импульс и момент есть pr , или $m \frac{h}{2\pi}$. Момент оказывается кратным $\frac{h}{2\pi}$, или кратным «единице» момента количества движения.

Интересным в этом результате является то, что радиус r при этом выпадает и ответ оказывается одним и тем же, независимо от того, велик или мал круг, хотя, конечно, на меньшем круге частица должна двигаться с большим импульсом, т. е. с большей скоростью, чтобы иметь тот же момент количества движения. Такая не-

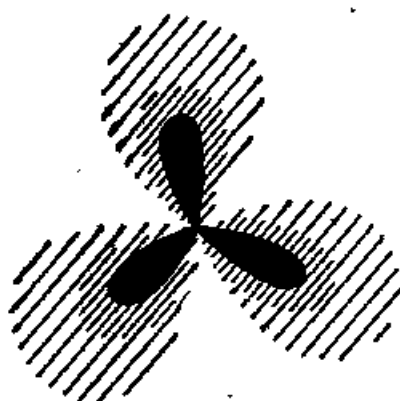


Рис. 45. Волна в плоскости, $m = 3$.

зависимость от радиуса наводит на мысль, что этот результат, быть может, справедлив даже тогда, когда частица не принуждена двигаться по кругу. Это, оказывается, действительно имеет место, однако для доказательства нам нужно глубже понять математическую сторону проблемы.

Рассмотрим сначала случай частицы, движущейся ради удобства изображения в плоскости; в этом случае для величины ее момента мы всегда получим целое кратное от $\frac{h}{2\pi}$; волна, описывающая частицу, будет выглядеть примерно так, как схематически изображено на рис. 45, где мы иллюстрировали случай момента $3 \frac{h}{2\pi}$, или, как мы скажем для краткости, трех единиц. Затемненные области указывают места, где волновая амплитуда положительна, в промежутках между ними она отрицательна. Вдоль любой замкнутой линии, окружающей центр, волна будет изменяться трижды от положительных к отрицательным значениям и обратно. На каком бы расстоянии ни происходил обход вокруг центра, мы всегда пересечем три полных волны.

Результат, что измерение момента количества движения всегда точно дает некоторое целое число единиц, или точное кратное $\frac{h}{2\pi}$, есть следствие волновой природы

частиц, такое же, как и установленный в предыдущей главе факт, что любое измерение энергии всегда приводит в точности к величине одного из энергетических уровней рассматриваемого атома. Мы увидим позже, в связи с экспериментом Штерна и Герлаха, что такое измерение момента вполне осуществимо практически и отнюдь не является просто академическим упражнением.

Рассмотрим теперь более реальный случай электрона, движущегося в пространстве, а не в плоскости, в окрестности притягивающего центра, как, например, в атоме водорода. Утверждение, что измерение момента относительно любой произвольной оси, проходящей через центр, может дать только целое число единиц, по-прежнему остается справедливым. На первый взгляд это приводит нас к противоречию. Действительно, из определения момента количества движения, данного в главе 1, можно показать, что если известен момент частицы относительно трех осей, расположенных под прямым углом друг к другу, т. е. относительно вертикальной оси, осей запад — восток и север — юг, то мы знаем его также и относительно любой другой промежуточной линии. Например, если момент велик относительно вертикальной оси и равен нулю относительно двух различных горизонтальных осей, то он должен равняться нулю также и относительно любой другой горизонтальной оси. Для линии, наклоненной относительно вертикали, соответствующий момент будет зависеть от ее угла наклона, будучи равен нулю, когда линия горизонтальна, и принимая наибольшее значение для вертикальной оси. Описанная здесь ситуация реализуется в действительности тогда, когда орбита частицы горизонтальна.

Однако то, что при изменении направления результаты измерений момента количества движения должны изменяться постепенно от нуля до самой большой величины, очевидно, никак нельзя примирить с выводом, согласно которому для величины момента всегда должно получаться целое число единиц. Когда момент не нуль, то его величина может равняться только одной единице или больше, но результат не может постепенно изменяться от нуля до единицы.

Этот парадокс разрешается с помощью принципа неопределенности. Исследуя возможные методы измерений

момента, мы найдем, что любое измерение момента относительно одной из осей должно изменять непредсказуемым образом момент относительно другой оси, так что мы никогда не можем знать момент относительно всех осей вместе. Связь этого результата с принципом неопределенности в его простой форме становится очевидной после замечания, что знание момента количества движения во всех направлениях фиксирует плоскость орбиты частицы; это было бы несовместимо с принципом неопределенности, поскольку (предполагая плоскость орбиты горизонтальной) определяло бы местоположение частицы по высоте (именно, положение на высоте центра притяжения, относительно которого происходит вращение) и одновременно ее вертикальную скорость, т. е. нуль, так как частица все время остается в одной и той же горизонтальной плоскости. Но мы уже видели, что одновременное знание как координаты, так и скорости частицы в том же направлении невозможно.

Существует только одна возможность, когда могут быть известны компоненты момента в любом направлении, — это случай, когда он равен нулю. В классической механике этому отвечал бы случай, когда «орбита» есть просто прямая линия, проходящая через центр притяжения, при этом частица движется вперед и назад, но теперь направление этой прямой было бы неизвестно. Конечно эта картина движения не должна приниматься слишком буквально.

Важной величиной в классической механике является полный момент M , который определяется так, чтобы его квадрат равнялся сумме квадратов моментов относительно трех осей, расположенных под прямыми углами друг к другу, $M^2 = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2$. Оказывается, что этот полный момент не зависит от направления трех осей до тех пор, пока они перпендикулярны друг к другу; если мы выберем их так, чтобы M_1 и M_2 равнялись нулю, то $M = M_3$ (это имеет место, если третья ось перпендикулярна к плоскости орбиты). В квантовой механике суммарный момент количества движения может быть определен таким же образом, и квадрат его оказывается, в наших единицах, всегда равным $l(l+1)$, где l может быть равно 0, 1, 2 или любому другому положительному

числу. Принцип неопределенности не запрещает одновременного измерения суммарного момента (и, следовательно, l) и момента относительно одной из осей, который должен быть целым числом (m) единиц. Момент относительно любой из осей не может превышать полного момента, поэтому m не может превышать l .

Зная полный момент и измеряя момент относительно какой-то выбранной оси, мы можем для последнего получить любое число единиц из $l, l-1, l-2, \dots, -l$, всего $2l+1$ возможностей. Например, если $l=1$, то m может быть равно 1, 0 или -1 .

Различные состояния с одним и тем же полным моментом можно представлять себе как орбиты одной и той же формы, но с различными ориентациями, вроде того, как это изображено на рис. 46. Заметим, что для $l=1$ и $m=1$ момент относительно заданной оси все еще меньше, чем полный, равный квадратному корню из $l(l+1)$, т. е. $\sqrt{2}$ единиц, поэтому орбита никогда не принимает положение, при котором момент достигает максимальной величины в заданном направлении. Так и должно быть, иначе мы при этом знали бы плоскость орбиты, что невозможно, как мы видели. В этом причина того, почему орбиты для $m=1$ и $m=-1$ на рис. 46 изображены так, что вращение происходит относительно наклонной оси. Происходит ли наклон вправо или влево, назад или вперед или каким-нибудь другим образом, должно оставаться неуточненным.

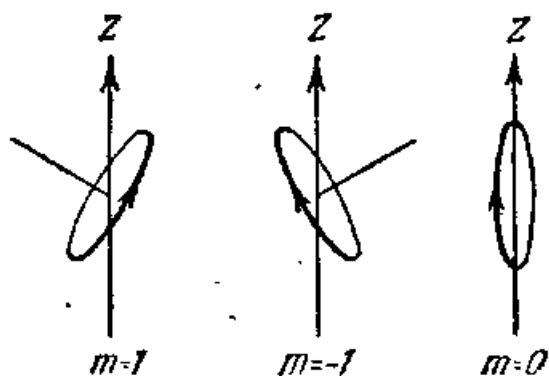


Рис. 46. Как можно изобразить орбиту с $l=1$ при движении вокруг центра.

Теперь можно детальнее описать волны, относящиеся к низшим состояниям электрона в водородном атоме. Для $n=1$ имеется только одна волна, принадлежащая $l=0$ и, следовательно, $m=0$. В этом случае момент отсутствует. Следовательно, обходя вдоль любой кривой вокруг центра, мы не заметим никаких колебаний в волне: она одна и та же по всем направлениям. Волна, однако, зависит от расстояния от центра. На рис. 47, а мы изобра-

зили изменение волновой амплитуды вдоль некоторой линии, проходящей через центр атома. Напомним, что квадрат

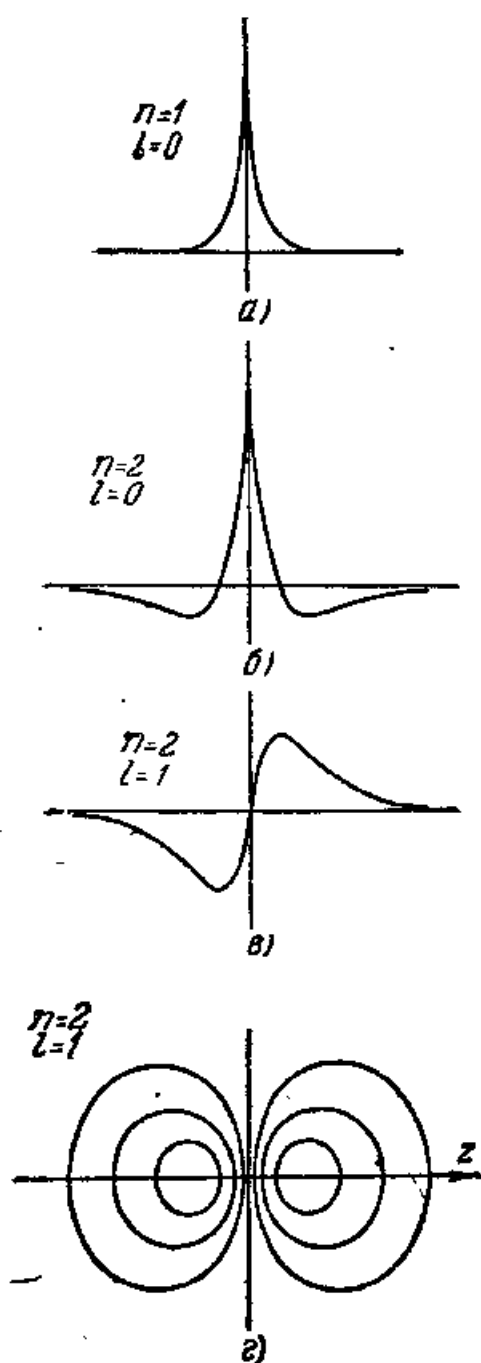


Рис. 47. Волны в атоме водорода.

а, б, в — радиальные сечения;
г — контурная карта.

амплитуда равна нулю, справа от нее амплитуда положительна, слева отрицательна. Два других состояния для тех же n и l выглядят аналогично, но вся картина повернута относительно рис. 47, г.

волновой амплитуды определяет вероятность нахождения электрона в данном месте. Другими словами, квадрат высоты кривой на рис. 47, а говорит нам о том, насколько вероятно найти электрон в некоторой точке на этой линии. На рис. 47, б мы показали, аналогично, сечение волны для $n=2$, все еще при отсутствии момента. Здесь волна имеет узел, т. е. она отрицательна на больших расстояниях и положительна вблизи центра; в целом она размыта гораздо больше от центра, что соответствует большему среднему радиусу, или тому факту, что электрон связан слабее. Помимо этого, тому же значению энергии принадлежат еще три состояния, все с $n=2$, но с $l=1$. Одно из них изображено на рис. 47, в. Волновая амплитуда здесь положительна с одной стороны от центра и отрицательна на противоположной стороне. Сечение по плоскости, проходящей через центр, для той же волны дано на рис. 47, г, где проведенные кривые изображают, как на карте рельефа, линии, вдоль которых волновая амплитуда постоянна. На линии, проходящей через центр,

Эксперимент с пучком атомов. Спин

Момент количества движения такого электронного состояния может быть определен на практике, поскольку электрон, вращающийся около центра, создает вокруг него электрический ток и поэтому ведет себя подобно слабому электрическому току в небольшой катушке. Как мы видели в главе 2, включение магнитного поля приводит к возникновению сил, действующих на катушку. Небольшая катушка с током образует точно такое же магнитное поле, как и маленький магнит, — обстоятельство, используемое в гальванометре с подвижной катушкой, где обычный магнит, необходимый для гальванометра, описанного в главе 2, заменяется маленькой катушкой, способной свободно поворачиваться и несущей электрический ток. Такая катушка стремится повернуться в таком направлении, чтобы ее собственное магнитное поле было противоположно полю внешнего магнита. Отсюда можно заключить, что ее энергия больше, когда она ориентирована параллельно внешнему полю, и меньше, когда она ориентирована противоположно. Поэтому, если магнитное поле неоднородно, т. е. сильнее в одном месте и слабее в другом, на катушку, ориентированную по полю, будет действовать сила в направлении уменьшения поля, тогда как катушку, ориентированную противоположно направлению магнитного поля, будет тянуть туда, где поле сильнее.

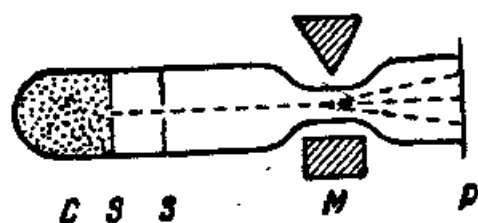


Рис. 48. Эксперимент с пучком атомов.

Эти соображения можно применить к атомам, что и было использовано в эксперименте Штерна и Герлаха, принципиальная схема которого изображена на рис. 48. Трубка тщательно эвакуировалась, чтобы в ней практически не было воздуха, исключая малое количество газа, который мог улечиваться из камеры С через очень маленькие отверстия в экранах S. Давление газа поддерживалось столь малым, чтобы каждый атом двигался по прямой линии, и вероятность того, что он столкнется с другим атомом, была бы очень мала. При этом наружу могли выходить только те из атомов, которые движутся вдоль линии,

соединяющей два отверстия. Эти атомы должны лететь в центре трубки вдоль пунктирной линии, указанной на рис. 48. Такой узкий пучок атомов называют атомным пучком. Этот пучок затем пропускают между полюсами большого магнита M , которому придана такая форма, чтобы его магнитное поле было гораздо интенсивнее около верхнего полюса, оканчивающегося в виде острого угла, чем вблизи широкого нижнего полюса. Следовательно, любой атом, где электрон вращается в том же направлении, в котором течет ток в электромагните, будет оттягиваться в сторону более слабого поля, т. е. вниз, а если он вращается в обратном направлении, то вверх. Если электрон вращается около горизонтальной оси, то атом вообще не будет отклоняться.

Можно видеть, что ожидаемое отклонение атомов зависит как раз от момента количества движения относительно вертикальной линии. Если взять поэтому атом, у которого электрон имеет полный момент, соответствующий $l=1$, то момент относительно вертикальной оси может быть 1, 0 или -1 . Надо думать поэтому, что некоторые атомы будут отклоняться вверх, некоторые — вниз, а часть вообще не будет отклоняться, соответственно трем пунктирным линиям, проведенным на рисунке. Атомы останавливаются на пластинке P . Эксперимент продолжается до тех пор, пока на пластинке не накопится достаточно атомов, чтобы их можно было заметить или определить их присутствие другими способами. В рассматриваемом случае можно ожидать появления на пластинке трех пятнышек: одного повыше, другого пониже и одного на центральной линии. С другой стороны, если бы мы имели дело с атомами, для которых $l=0$, т. е. момент отсутствует, то эти атомы не могли бы нести круговой ток и поэтому не отклонялись бы. Мы должны в этом случае увидеть только одно пятнышко в центре.

Результаты в некоторых случаях совпадают с тем, что мы ожидали. Например, гелий, который, как мы перед этим видели, имеет два электрона в состояниях с $n=1$ и поэтому $l=0$, как и должно быть, не отклоняется. Но атомы водорода, которые также не должны были бы отклоняться, на самом деле обнаруживают два пятнышка; эти два пятнышка соответствуют отклонению, которое ожида-

лось бы для $m=1$ и $m=-1$, но при этом нет пятна на центральной линии.

Объяснение состоит, как упоминалось, в том, что электрон, помимо движения вокруг протона, как бы способен еще вращаться относительно своего собственного центра. Мы видели, что если полный момент есть $\sqrt{l(l+1)}$ единиц, то имеется $2l+1$ возможных состояний, т. е. для $l=0, 1, 2, \dots$ атом имеет 1, 3, 5, ... возможных состояний. Так как в случае водорода мы получаем два пучка, спин должен иметь только два возможных состояния, что получается, если взять $\frac{1}{2}$ для l . Спиновый момент электрона

относительно любой линии также должен быть либо $\frac{1}{2}$, либо $-\frac{1}{2}$. Но в магнитном отношении внутреннее вращение электрона должно быть вдвое эффективнее, чем его обращение по орбите, так как эксперимент показывает, что, когда момент относительно направления поля есть $\frac{1}{2}$, сила оказывается той же самой, что и для орбиты с $m=1$.

Исторически предположение о существовании спина электрона было впервые выдвинуто Гаудсмитом и Юленбеком, правда, не на основе описанного здесь эксперимента, а в результате изучения эффекта Зеемана, состоящего в изменении спектральных линий газа в присутствии сильного магнитного поля. В основном аргументация была очень схожа с той, которой пользовались мы, но ее изложение потребовало бы большего привлечения математики.

Таким образом, в итоге оказывается, что атом водорода имеет момент количества движения из-за наличия спина у электрона, а гелий не имеет, поскольку два электрона, движущиеся одинаковым образом, должны по принципу Паули иметь противоположно направленные спины, и их моменты поэтому должны взаимно сокращаться.

Обратимся к литию. Два внутренних электрона будут по-прежнему иметь противоположные спины, момент в целом будет теперь зависеть от того, какую из четырех возможных орбит с $n=2$ избрать для третьего электрона.

У водорода все четыре состояния с $n=2$ имеют одну и ту же энергию, но для лития или любого другого элемента это уже не так. Причину этого можно увидеть, обращаясь снова к рис. 47. Если мы сравним рис. 47, б и 47, в, мы увидим, что на первом из них волна сосредоточена заметно ближе к центру, и поэтому в таком состоянии электрон имеет большую вероятность оказаться ближе к центру. Кривая рис. 47, в пересекает горизонтальную ось в центре, что означает, что волна и ее квадрат равны в центре нулю. Поэтому электрон стремится удалиться от центра. В классической механике для частицы, обладающей моментом количества движения, как мы видели в главе 1, это происходит благодаря действию центробежных сил. Мы видим теперь, что то же самое имеет место и в квантовой теории. Притяжение электрона вблизи центра в атоме лития гораздо сильнее по сравнению с атомом водорода; поскольку вблизи центра экранирующее действие отталкивания со стороны двух внутренних электронов наименее эффективно. Поэтому если два состояния имеют одну и ту же энергию в водороде, то при наличии внутренних электронов первое из них, с $l=0$, будет обнаруживать большую связь и, следовательно, меньшую энергию. Следовательно, можно ожидать, что последний из электронов в литии находится в состоянии с $l=0$ и, как и для водорода, момент атома лития равен просто спину электрона. Пучок атомов лития в установке рис. 48 опять должен расщепиться на два, причем силы, отклоняющие пучки, должны быть такие же, как и в случае водорода; это и имеет место на самом деле.

В следующем атоме, бериллии, в состоянии $n=2$, $l=0$ добавляется второй электрон. Чтобы удовлетворить принципу Паули, он должен иметь противоположно направленный спин. Следовательно, атом имеет нулевой момент, и пучок не должен расщепляться. Это опять подтверждается на опыте.

Перейдем теперь к бору. Поскольку уровни с $n=1$ и $n=2$, $l=0$ заняты, электрон должен попадать на следующий уровень с $n=2$ и $l=1$. Момент атома будет теперь зависеть от направления спина электрона относительно его орбиты. Какое расположение является наиболее выгодным, опять представляет сложный вопрос, ввиду того, что как обращение электрона по орбите, так и его враще-

ние относительно собственного центра приводят к возникновению магнитных полей. Если взаимодействие их вычислить непосредственно, то в этом случае оказывается, что состояние с наименьшей энергией, следовательно нормальное состояние атома, получается тогда, когда спин почти антипараллелен орбитальному моменту (насколько он может быть антипараллелен, не нарушая принципа неопределенности). Поэтому моменты вычитаются, и поскольку для орбиты может быть максимально одна единица момента относительно любой данной оси, а для спина — половина единицы, то в результате получаем $\frac{1}{2}$; нормальный атом бора имеет поэтому $(2 \cdot \frac{1}{2} + 1) = 2$ возможных состояния, а его момент относительно любой оси равен $\frac{1}{2}$ или $-\frac{1}{2}$. Пучок атомов бора в установке Штерна — Герлаха должен расщепиться на два; это и имеет место. Величина отклоняющих сил также может быть предсказана. Этот расчет усложняется тем, что спин вдвое эффективнее орбитального момента в магнитном отношении, однако его удается выполнить, и результат опять подтверждается экспериментом.

Следующим идет атом углерода. Здесь два электрона находятся в состоянии $l=1$. Оказывается, что они располагаются так, чтобы их спины складывались; максимальный суммарный орбитальный момент, допускаемый принципом Паули, тогда равен единице. В нормальном состоянии атома углерода суммарный спин направлен опять противоположно суммарному орбитальному моменту. В результате полный момент атома углерода равен нулю. Пучок атомов углерода поэтому не будет расщепляться. На самом деле это не было проверено, поскольку на практике очень трудно получить пары углерода, однако нет сомнения, что эксперимент опять дал бы правильный ответ.

Можно продолжать в том же духе вплоть до фтора, в котором заполнены все, кроме одного, состояния с $n=2$. Вместо утомительного исследования того, что прибавляет каждый из электронов, заметим, что если бы мы добавили к фтору еще один электрон, то все места были бы заполнены и моменты количества движения в любом направлении

должны были бы сократиться, так как имелось бы два электрона с $m=1$, два с $m=0$ и два с $m=-1$, тогда как три электрона должны иметь спин $\frac{1}{2}$ и три других спин $-\frac{1}{2}$

относительно некоторой оси. Поскольку добавление одного электрона, таким образом, должно было бы обратить в нуль полный момент, момент атома фтора будет противоположен по знаку и равен по величине моменту одного электрона в состоянии $l=1$. Другими словами, здесь мы имеем такую же ситуацию, как и в атоме бора. В данном случае, однако, в отличие от атома бора, в нормальном состоянии орбитальный и спиновый моменты складываются. Полный момент количества движения атома фтора в нормальном состоянии, таким образом, равен $3/2$.

В благородном газе неоне заполнено последнее место с $n=2$; атом неона не имеет момента количества движения. В следующем атоме, натрия, последний электрон должен попасть в состояние с $n=3$, $l=0$, что делает его свойства очень похожими на характерные свойства лития.

Электронные оболочки, ионные молекулы

Мы видим поэтому, что вдоль периодической таблицы элементов последовательно заполняются различные энергетические уровни. Принято использовать стандартные обозначения для состояний с квантовыми числами 1, 2, 3,...; об этих состояниях говорят, как о K, L, M, N, \dots оболочках.

На рис. 49 показано постепенное заполнение оболочек по мере того, как мы добавляем все больше и больше электронов. Вначале приведена схема энергетических уровней водорода и показан электрон, занимающий наинизший уровень. Заштрихованная область вверху представляет собой энергии, при которых электрон уходит из атома; поэтому расстояние от самого низшего уровня до начала заштрихованной полосы — это энергия, необходимая, чтобы ионизовать водород. В последующих диаграммах для других атомов важно помнить, что этот масштаб в них не выдержан. Если бы эти рисунки сделать в той же шкале, то каждая из диаграмм была бы больше предыдущей и, например, для натрия расстояние наинизшего уровня от начала ионизации было бы в сто раз больше,

чем для водорода, а расстояние последнего электрона от заштрихованной площади было бы почти так же велико, как весь рисунок для водорода.

Стрелки на символах электронов указывают направление спина. Для любого заданного электрона нет оснований предпочесть то или иное направление спина, диаграмма просто иллюстрирует тот факт, что электроны в одном

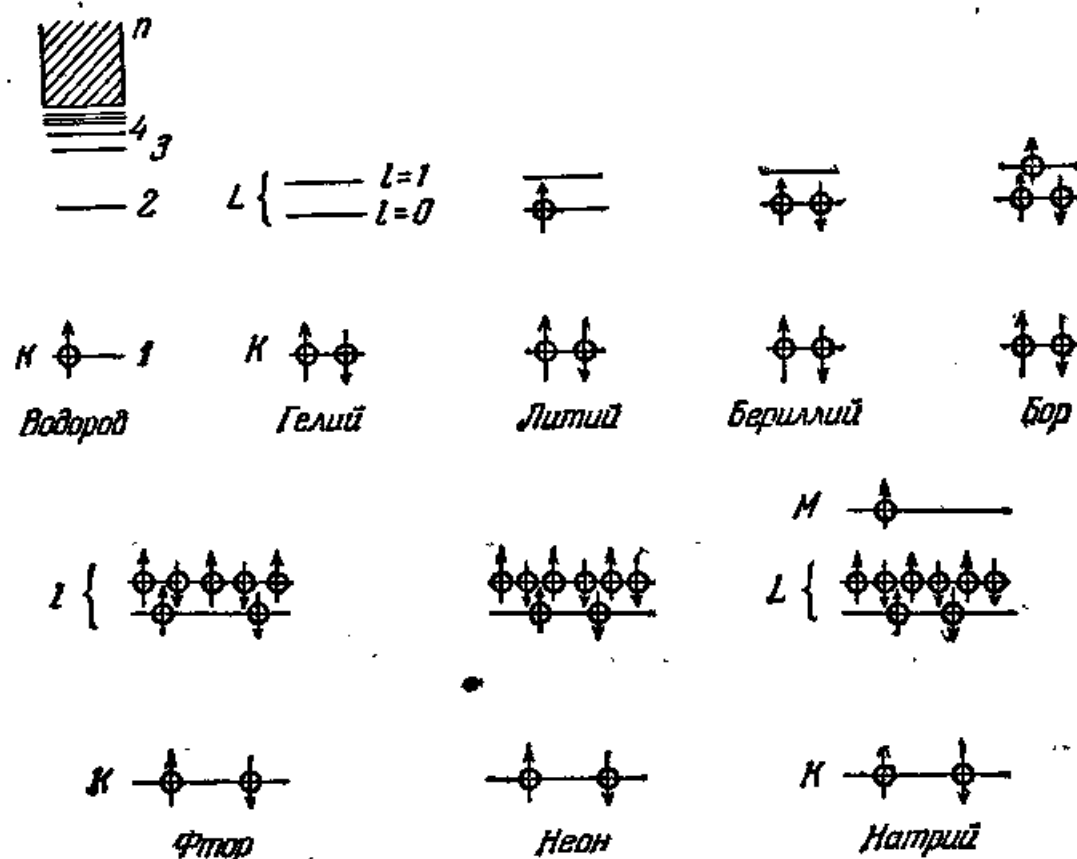


Рис. 49. Атомные оболочки.

и том же состоянии движения должны обязательно иметь противоположные спины.

Поглощение света атомом мы должны представлять себе следующим образом: если световой квант обладает энергией, как раз необходимой для того, чтобы перебросить один из электронов на более высокий энергетический уровень, атом может поглотить энергию светового кванта, который при этом исчезает. Атом находится в некотором «возбужденном состоянии»; избыток энергии он потратит либо на то, чтобы испустить другой световой квант, либо, если поблизости расположены другие атомы, эта энергия может быть поделена между несколькими атомами и в конце концов превратится в тепло.

Спектры всех атомов, т. е. точная окраска света, который они способны испускать или поглощать, образуют очень длинный каталог — результат работ по спектроскопии высокой точности. Мы вышли бы далеко за рамки этой книги, если бы попытались описать их сколько-нибудь детально; нам важно, однако, знать, что они дают достаточные доказательства в поддержку наших общих законов. Практически конечно, на основе этих законов невозможно вычислить точное положение каждой спектральной линии для каждого элемента, поскольку в задаче с очень большим числом электронов математическая сторона проблемы становится чрезвычайно сложной. Но во всех случаях, достаточно простых и допускающих решение уравнений, а также там, где из квантовых законов можно получить некоторые общие правила относительно природы спектров, данные наблюдений находятся в согласии с теорией.

Те же концепции могут быть использованы в интерпретации свойств ионов, т. е. атомов, имеющих одним электроном меньше или больше. В частности, известно, что последний электрон в натрии связан не очень сильно, поскольку при заполненных *K*- и *L*-оболочках он должен находиться на *M*-уровне с $n=3$, и поэтому его энергия связи составляет половину этой величины для предшествующих электронов. С другой стороны, фтор имеет вакансию на *L*-оболочке, и, хотя атом уже электрически нейтрален, к нему можно добавить еще один электрон, который будет удерживаться в нем со значительной энергией.

Действительно, если атом натрия и атом фтора близко подходят друг к другу, последний электрон натрия может перейти к атому фтора, в результате чего образуются положительный ион натрия и отрицательный ион фтора, испытывающие притяжение друг к другу. Поэтому они по-прежнему будут оставаться друг около друга, образуя то, что химики называют молекулой фтористого натрия. При образовании такой молекулы из двух нейтральных атомов высвобождается энергия. Для того чтобы удалить электрон из атома натрия, необходимо некоторое количество энергии, но это количество возмещается, когда электрон попадает в атом фтора, а также за счет взаимного

притяжения двух ионов. Очевидно, то же самое происходит, если вместо натрия мы имеем дело с атомом любого другого щелочного металла, т. е. с любым другим атомом, содержащим один электрон вне замкнутой оболочки. Это относится к любому элементу, непосредственно следующему в периодической таблице за каким-нибудь из благородных газов. Среди небольшого числа элементов, которые мы детально рассмотрели, таким примером является литий, потом калий, который в периодической таблице следует за благородным газом аргоном. В равной мере мы могли бы заменить фтор любым другим элементом, в атоме которого не хватает одного электрона до заполненной оболочки и который поэтому в периодической таблице предшествует благородному газу. Таков хлор, стоящий перед аргоном. Хлористый натрий, поваренная соль, является типичным примером соединений подобного рода.

Так как атомы элементов вроде натрия легко теряют электрон и становятся положительными ионами, их называют электроположительными, тогда как атомы типа фтора называют электроотрицательными. Водород играет двойную роль, будучи и электроположительным и электроотрицательным. Он может потерять электрон, после чего остается просто ядро водорода, протон, и тогда он образует соединения с электроотрицательными элементами типа хлора. Такое соединение обладает сильной тенденцией к замещению водорода более электроположительным элементом, поскольку, чтобы удалить электрон из водорода, требуется гораздо больше энергии, чем, например, для удаления из атома лития или натрия. Комбинация хлора и водорода известна под названием соляной кислоты; ее коррозирующие свойства поэтому понятны, поскольку известно, например, что хлористый натрий и нейтральный водород вместе имеют меньшую энергию, чем соляная кислота и нейтральный натрий. С другой стороны, водород способен также захватить добавочный электрон, который заполнил бы K -оболочку, что ведет к возможности образования таких соединений, как гидрид лития, состоящий из отрицательно заряженного водорода и положительно заряженного лития.

Таким образом, квантовые законы для атомов объясняют также некоторые из процессов, в которых атомы

соединяются в молекулы и в которых элементы образуют соединения. Тем самым обнаружено, что некоторые из законов химии являются следствием квантовых законов.

Другие типы молекул

Не все соединения, однако, могут быть объяснены подобным образом. Соединения, в которых каждая молекула состоит из одного (или больше) положительного и одного (или больше) отрицательного ионов, удерживаемых вместе электрическими силами, называют ионными соединениями. Из других типов молекул наиболее простой пример — молекула водорода, содержащая два атома водорода. Как упоминалось в предыдущих главах, естественный газообразный водород содержит не отдельные атомы, а атомы, соединенные попарно в молекулы. Эти

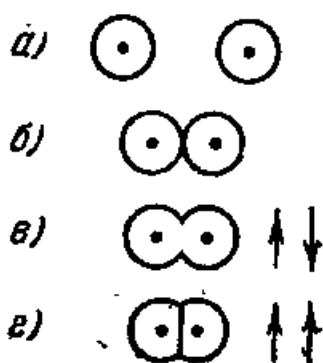


Рис. 50. Молекула водорода.

молекулы не состоят из ионов, и в действительности нет причин ожидать, чтобы из двух атомов водорода в молекуле один был положительно, а другой отрицательно заряженным. Как же образуется молекула водорода?

Чтобы это понять, рассмотрим два атома водорода, медленно сближаемых друг с другом, как это изображено на рис. 50. На рис. 50, а атомы еще полностью разделены; точки изображают ядра (протоны), а кружки — область, занимаемую электронной волной около каждого из них. На самом деле эта волна не имеет резкого края и спадает постепенно, но для наших целей картина достаточно хороша. Поскольку каждый из атомов электрически нейтрален, он не вызывает вне себя электрического поля, поэтому в этом состоянии между атомами не действуют ни отталкивающие, ни притягивающие силы. На рис. 50, б атомы начинают соприкасаться и на рис. 50, в они перекрываются.

Мы видели в предшествующей главе, что энергия основного состояния атома водорода есть сумма отрицательной (притяжение) потенциальной энергии и положительной кинетической энергии. Если бы область, занимае-

мая электронной волной, расширилась в сторону более слабого притяжения, это привело бы к уменьшению среднего потенциала притяжения; если бы эта область сузилась, это привело бы к большей величине для отрицательной потенциальной энергии, но при этом волна содержала бы более короткие длины волн и, следовательно, большие скорости, а поэтому и более высокую кинетическую энергию. В случае *в* область, в которой имеет место сильное притяжение, больше; поэтому каждый электрон может быть размазан по большему пространству и для того же притяжения может иметь большие длины волн, а поэтому меньшую кинетическую энергию. В случае *в* энергия могла бы быть поэтому меньше.

Необходимо, однако, вспомнить о принципе Паули; его действие может быть различно в зависимости от того, параллельны или антипараллельны спины электронов. Рассмотрим сначала случай противоположных спинов. Здесь принцип Паули не запрещает электронам двигаться одинаковым (с одинаковой волной) или почти одинаковым образом; они оба могут поэтому пользоваться всей областью притяжения, изображенной на рис. 50, *в*. Можно заключить отсюда, что энергия электронов в случае *в* меньше, чем в *а*; другими словами, что энергия двух атомов водорода гораздо меньше, когда они расположены близко, чем когда они удалены друг от друга. Следовательно, они друг друга притягивают.

Рассмотрим, однако, что происходит, когда спины электронов параллельны. В этом случае согласно принципу Паули электроны не могут двигаться в одной и той же волне, и в области притяжения на рис. 50, *в* может находиться только один электрон с волной, занимающей эту область целиком. Другими словами, очевидно, что в этом случае следует разделять всю область на две части, каждая из которых соответствует одному из двух электронов. На рис. 50, *г* область притяжения разграничена. Очевидно теперь, что внутри области, в которой существует сильный притягивающий потенциал, на каждый электрон приходится меньшее пространство, чем в отдельном атоме. Можно ожидать поэтому, что энергия в этом случае будет выше, чем энергия разведенных атомов. Мы видим, таким образом, что два водородных атома будут взаимно

притягиваться, если спины электронов противоположны, и отталкиваться, если спины параллельны.

Это также объясняет, почему сильное притяжение существует только между двумя атомами одновременно. Нельзя образовать молекулу водорода, содержащую три атома, поскольку имеются только два возможных направления спина. Действительно, предположим, что мы отправляемся от нормальной молекулы водорода (рис. 51), в которой, как мы видели, спины электронов должны быть направлены в противоположных направлениях. Если

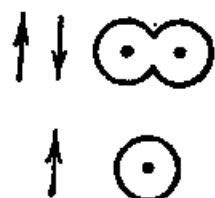


Рис. 51.
Двух атомов
водорода до-
статочно.

приближается еще один атом водорода, то спин его электрона должен быть параллельным спину одного из электронов в молекуле, поэтому область, занимаемая этими электронами, неэффективна для третьего электрона из-за принципа Паули.

Эти идеи хорошо согласуются с концепцией химической валентности, которая была введена для описания химических свойств атомов. Согласно последней каждый атом имеет некоторое число «валентностей», или возможных связей; мы можем описывать допустимые соединения, объединяя связи каждого атома со связями других атомов. Это правило может быть сформулировано так, как если бы каждый атом имел несколько ниточек, свешивающихся из него, и молекула образовывалась бы из атомов связыванием этих ниточек. В стабильной молекуле не должно оставаться лишних концов. Химики пользуются формулами, в которых эти валентности, или связи, изображаются линиями; правильная формула должна иметь правильное число линий, начинающихся от каждого из символов. Водород имеет одну связь, в этом смысле структурная формула молекулы водорода есть $\text{H}-\text{H}$. Согласно правилу это есть полная молекула без свободных связей, она не должна быть химически активна, что согласуется и с реальными свойствами водорода и с нашими выводами из квантовой теории.

Более интересный случай представляют собой соединения углерода (химический символ C), имеющего четыре такие связи, поскольку атом углерода содержит четыре электрона в L -оболочке. Последние могут двигаться с

четырьмя различными электронными волнами (характеризуемыми, например, соответственно числами $l=0$; $l=1$, $m=1$; $l=1$, $m=0$; $l=1$, $m=-1$); спин любого из них поэтому может свободно поворачиваться любым образом, не противореча принципу Паули. Каждый из этих электронов может разделять часть своего «жизненного пространства» с электроном другого атома, находящегося по соседству, при условии, что их спины соответствующим образом упорядочены. На рис. 52 изображена структурная формула метана — газа, который часто встречается в каменноугольных копях и нефтяных скважинах и содержится в обычном коммерческом газе. Четыре связи, проведенные от атома углерода, соединяются каждая с одной связью от атома водорода, после чего не остается лишних концов.

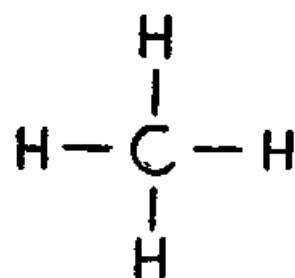


Рис. 52. Структурная формула метана, употребляемая химиками.

Соединения, содержащие углерод и водород подобным образом, имеют особую важность в «органической» химии. Это наименование показывает, что соединения такого рода встречаются в большом разнообразии как в потребляемой пище, так и в отходах живых организмов. Не будет большим преувеличением сказать, что ионные соединения, обсуждавшиеся нами вначале, образуют основу неорганической химии, а соединения, возникающие от того, что два электрона разделяют одну область сил притяжения, — основу органической химии.

Также легко понять, почему благородные газы типа гелия химически неактивны. Атом гелия с трудом теряет электрон, поскольку он находится на очень низко расположенном K -уровне, но гелий и не может захватить дополнительно электрон, поскольку этот последний попал бы на L -оболочку, где практически уже отсутствуют силы притяжения, так как два K -электрона, тесно окружающие ядро, будут почти полностью нейтрализовать его поле. Поэтому гелий не способен образовывать ионные соединения; но он и не может допустить в свое поле притяжения электрон из других атомов, поскольку в этом поле уже находятся два электрона с противоположными спинами, — ровно столько, сколько допускает принцип Паули. В случае

двух атомов гелия (или двух атомов любого благородного газа) всегда действуют силы отталкивания при очень тесном их сближении; заставляя атомы перекрываться, мы в действительности уменьшаем пространство, в котором может двигаться любой из электронов, и поэтому переводим электроны в состояния с более короткими длинами волн и большей кинетической энергией.

То же самое относится к ионам, таким, как натрий и фтор. Положительный ион натрия и отрицательный ион фтора имеют электроны в тех же состояниях, что и два атома неона. Если они удалены друг от друга так, что электронные волны не перекрываются, единственные силы, действующие между ними, — это силы притяжения между отрицательным и положительным электрическими зарядами; но когда они подходят друг к другу так близко, что электронные волны начинают перекрываться, эти силы перевешиваются силами отталкивания такого же происхождения, что и в случае двух атомов неона.

Твердые тела, металлы, жидкости

Эти представления естественно приводят к пониманию по крайней мере одной типичной формы твердого вещества.

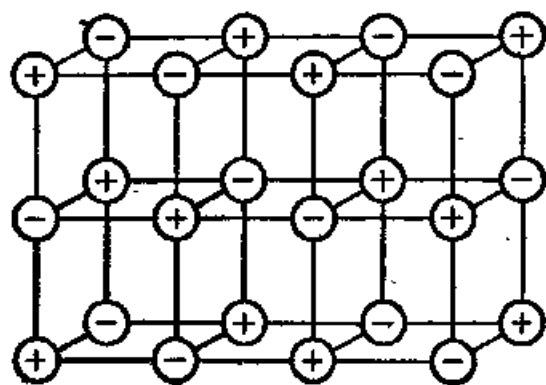


Рис. 53. Строение хлористого натрия (поваренная соль).

Рассмотрим какую-нибудь соль, скажем обычную соль, хлористый натрий, которая, как мы видели, состоит из положительных ионов натрия и отрицательных ионов хлора. По изучению дифракции рентгеновских лучей найдено, что эти ионы должны составлять правильное образование, вид которого приведен на рис. 53. Основой является куб, как

это изображено на рисунке, с ионами в каждом углу, расположенными таким образом, чтобы любые два соседних иона были противоположных знаков. Этот куб затем повторяется правильным образом неопределенное число раз. Такое расположение действительно является

очень выгодным, поскольку при этом каждый отрицательный ион окружен шестью положительными и наоборот, так что каждый ион находится в поле притяжения. Если бы мы учли только электрическое притяжение, вся структура должна была бы, казалось, немедленно разрушиться, поскольку притяжение стремится притянуть каждый атом все ближе и ближе к своим соседям. Это прекратится, однако, как только атомы начнут перекрываться, поскольку начнет играть роль отталкивание замкнутых оболочек. В нормальном состоянии в твердом хлористом натрии ионы будут находиться на таких расстояниях, чтобы электронные волны только начинали перекрываться. Для дальнейшего сжатия мы должны были бы преодолеть силы отталкивания, возникающие при перекрывании; для увеличения объема необходимо было бы преодолеть электрическое притяжение между ионами. Зная размеры электронной волны в каждом атоме, можно найти отсюда, какими должны быть расстояния между ионами, и, следовательно, размеры данного количества хлористого натрия; ответ снова оказывается правильным. Можно также сравнить энергию, связанную со структурой, изображенной на рис. 53, с энергией какого-нибудь другого расположения ионов. Если провести такое сравнение, то оказывается, что структура рис. 53 отвечает наименьшей возможной энергии и должна быть поэтому той формой, которая осуществляется в природе.

Этот тип твердого вещества не единственный из возможных. Существование другого типа обусловлено химическими связями, или валентностями, которые мы обсуждали в связи с рис. 50—52. Типичным примером служит алмаз, состоящий из чистого углерода. В нем атомы углерода образуют правильную решетку, каждый из них разделяет одну из своих четырех связей с одним из своих соседей. Твердые тела типа алмаза представляют собой гораздо более трудную проблему для математика, чем хлористый натрий, однако и здесь мы можем значительно продвинуться в понимании их свойств.

Еще одной интересной формой твердого вещества являются металлы, такие, как натрий, алюминий, медь, серебро и т. д. Все это электроположительные элементы, т. е. их атомы достаточно легко теряют один или больше

из своих электронов. В этом случае электроны уже не связаны с отдельными атомами и могут двигаться по целому куску металла, как бы он ни был велик. Причина опять в том, что электроны могут обмениваться своими областями. При попытках проследить это количественно вычисления показывают, что при этом возникает притяжение, удерживающее атомы металла в одном куске.

При вычислениях необходимо, конечно, опять учесть принцип Паули. Можно объяснить, к чему это приводит, значительно упростив проблему. Будем игнорировать силы, действующие на электроны при их движении через металл мимо атомов (состоящих теперь только из ядер и замкнутых оболочек электронов), как если бы электроны двигались свободно в большом «ящике». Каждый электрон может быть представлен волной с такой длиной, чтобы либо целое, либо полуцелое число длин волн как раз укладывалось в ящике. Среди всех состояний имеется состояние с наименьшей энергией электрона, в котором длина волны равна удвоенным размерам ящика; согласно принципу Паули в этом состоянии могут находиться только два электрона. В следующем состоянии длина волны равна длине ящика, в нем также могут находиться только два электрона, и т. д. Чтобы найти состояние движения всех электронов, мы должны продолжать заполнять эти уровни до тех пор, пока не соберем все электроны. Оказывается, что наиболее быстрые электроны, содержащиеся в металле, обладают длиной волны, в грубом приближении равной расстоянию между двумя соседними атомами.

Ферми и Дираком было впервые указано, что даже при таком большом объеме, как реальный кусок металла, и даже для очень большого числа электронов принцип Паули следует учитывать; статистическое изучение большого числа частиц, подчиняющихся принципу Паули, называют теперь статистикой Ферми — Дирака.

На первый взгляд кажется очень удивительным, что в этом случае нужно учитывать принцип Паули, так как мы могли бы применить нашу аргументацию, скажем, к куску проволоки в несколько дюймов длиной. Трудно поверить, чтобы электрону на одном конце проволоки было запрещено иметь точно ту же скорость, что и у электрона на ее другом конце (если их спины не противоположны),

так как нет, казалось бы, причин, по которым два электрона, находящиеся так далеко, могли бы как-нибудь влиять друг на друга. Этот парадокс разрешается сам собой, если мы вспомним о принципе неопределенности. Если известно местоположение электрона даже в таких неточных пределах, как половина всего куска металла, это необходимо приводит к некоторой неопределенности в его скорости. Можно показать, что эта неопределенность как раз достаточна, чтобы не допустить ответа на вопрос, принадлежит ли электрон одной из волн, соответствующих данному ящику, или следующей. Поэтому никакого нарушения принципа Паули здесь обнаружено быть не может. На самом деле, вместо того чтобы утверждать, что скорости обоих электронов точно фиксированы и должны быть различны, мы можем также говорить о движении электронов, задавая приближенно их скорость и дополнительно некоторые грубые сведения о том, где каждый из них находится. Точность при этом должна быть выбрана такой, чтобы удовлетворить принципу неопределенности. В этом случае мы можем сказать, что если электроны находятся в разных местах, то принцип Паули не ограничивает их скоростей. Только если они могут быть в одном и том же месте (с той точностью, с которой мы определили их положение), их скорости должны быть заметно различными.

Тот факт, что электроны в металле управляются принципом Паули, или статистикой Ферми — Дирака, устраняет одно из главных препятствий на пути к пониманию свойств металлов. Уже довольно давно из факта наличия у металлов высокой электрической проводимости был сделан вывод, что они должны содержать большое число электронов, способных двигаться почти как свободные. Но, как мы видели в главе 5, при нагревании объема, содержащего очень большое число частиц, его энергия должна возрасти на величину $\frac{3}{2} kT$ на частицу, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Если число электронов в металле сравнимо с числом атомов, что всегда справедливо, электроны должны давать основной вклад в удельную теплоемкость металлов, тогда как в действительности удельная теплоемкость металла очень

близка к теплоемкости неметаллических твердых тел и может быть объяснена одним только движением атомов.

Те же трудности возникали в главе 5 при рассмотрении электронов внутри любого атома, но теперь мы знаем, что такие электроны расположены на определенных уровнях энергии и при обычных температурах расстояние между этими уровнями гораздо больше, чем kT . Атом поэтому не может принять того количества энергии, которое он должен

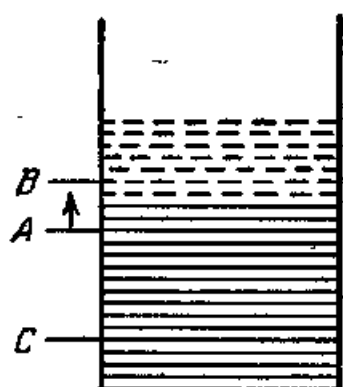


Рис. 54. Много электронов в ящике (статистика Ферми).

был бы иметь по кинетической теории, если она основана на классической механике. Непосредственно к металлу это утверждение неприменимо, так как, поскольку мы имеем дело с очень большим ящиком, последовательные уровни электрона в таком ящике расположены чрезвычайно близко друг к другу. Однако электроны заполняют все эти уровни энергии полностью до некоторой весьма высокой точки. На рис. 54 сплошные линии изображают занятые, а пунктирные линии — вакантные уровни.

При нагревании металла каждый электрон мог бы приобрести дополнительную энергию порядка kT , но воспользоваться этим может только небольшое число электронов. Электрон вблизи верхних заполненных уровней, скажем в состоянии *A*, может перейти в состояние *B*, если это расстояние равно примерно kT . Но, например, электрон в состоянии *C* уже не может возбудиться на такую величину, поскольку он при этом попал бы на уже занятый уровень; чтобы этот электрон получал энергию, она должна была бы быть гораздо больше. Из этой аргументации следует, что в удельную теплоемкость может вносить вклад лишь очень небольшая часть всех электронов — те, энергия которых лежит в интервале kT от верхних заполненных уровней; их число, вообще говоря, слишком мало, чтобы быть существенным. В особо благоприятных условиях, однако, электронная удельная теплоемкость может быть наблюдаена.

Мы привели только один из примеров, взятый из квантовой теории металлов, развившейся в широкую и инте-

ресную область, в которой многообразное применение квантовой теории позволило внести порядок в целый ряд на первый взгляд противоречивых экспериментальных фактов. В этой области, однако, имеется также одна из основных не решенных в настоящее время проблем, заключающаяся в явлении сверхпроводимости. Обнаружено, что при охлаждении ниже некоторой температуры ряд металлов внезапно и резко теряет электрическое сопротивление; эта температура обычно несколькими градусами выше абсолютного нуля. Сразу же за этой температурой

их свойства становятся необычными в ряде отношений. Мы имеем здесь дело с таким явлением в свойствах вещества, для которого еще не найдено полностью удовлетворительного объяснения, хотя за последние несколько лет были сделаны различные предположения, которые, как кажется, содержат по



Рис. 55. Удельная теплоемкость твердых тел.

крайней мере значительную долю правды. Однако скорее всего мы имеем здесь дело не с нарушением законов квантовой теории, а с проблемой, включающей по необходимости большое число атомов и электронов и очень чувствительно зависящей от их взаимодействия, а потому настолько сложной, что мы не в состоянии в настоящее время найти правильный путь к ее исследованию *).

Другим интересным вопросом является удельная теплоемкость твердых тел при низких температурах. Мы в главе 5 видели, что удельная теплоемкость большинства твердых тел при комнатных температурах и выше есть $3k$ на атом, как требуется законом Дюлонга и Пти, вытекающим из кинетической теории. Однако при охлаждении до более низких температур удельная теплоемкость падает и стремится к нулю по мере того, как температура приближается к абсолютному нулю. На рис. 55 изображено

*) За последние годы проблема сверхпроводимости была успешно решена на основе общих законов квантовой механики. [Прим. ред.]

характерное поведение удельной теплоемкости твердого тела. Оно также может быть понято.

Согласно изложению главы 5 удельная теплоемкость соответствует тому факту, что атомы могут колебаться около своего положения равновесия. Каждый атом принадлежит некоторому положению в правильной решетке, и силы, действующие на него со стороны соседних атомов, стремятся удержать его в этом положении, поэтому при каком-либо возмущении он будет колебаться относительно этого положения. Если применить квантовую механику к этой задаче, то в этом случае возникает та же ситуация, что и на рис. 40; можно опять ожидать в этой проблеме резких и определенных уровней энергии. В то время как по кинетической теории атом должен был бы колебаться в среднем с энергией kT , наименьшая энергия, которую он фактически может получить, равна энергии, необходимой для перехода на первый возбужденный уровень энергии. Если последняя много больше kT , т. е. при низких температурах, вероятность атому получить так много энергии очень мала.

Здесь имеется большое сходство с тем, что наблюдалось в случае излучения черного тела, уже детально обсуждавшегося нами ранее; по приведенным там соображениям тепловая энергия на самом деле оказывается много меньше по сравнению с предсказаниями классической механики. Это простое объяснение удельной теплоемкости твердых тел было дано Эйнштейном. Представленная здесь картина является упрощением, поскольку я излагал дело таким образом, как если бы каждый атом двигался независимо от своих соседей. При точном рассмотрении надлежит учитывать в равной степени и движение всех соседей. Более точное исследование, предпринятое впервые Дебаем, очень хорошо отвечает известным фактам.

Мы уже обсуждали свойства газов и свойства твердых тел, но еще не затрагивали жидкого состояния. Общее объяснение механизма плавления твердых тел уже было дано в главе 5; квантовая теория не изменяет существенно ту картину, которая там была описана. Математическое исследование жидкостей более затруднительно, чем газов или твердых тел. Проблема газа упрощается тем обстоятельством, что молекулы газа движутся независимо друг

от друга и лишь случайно сталкиваются между собой. Упрощение для твердого тела возникает из-за того, что каждый из атомов не удаляется далеко от своего нормального положения в правильной структуре, или «решетке». Никакое из этих утверждений не применимо к жидкости, в результате чего мы оказываемся перед необходимостью иметь дело со сложным движением очень большого числа атомов, непрерывно сталкивающихся друг с другом. Детальное описание жидкого состояния оказывается поэтому менее полным, чем для газов или твердых тел.

Совершенно исключительным примером жидкости является жидкий гелий. Описывая жидкости в главе 5, мы связывали плавление, т. е. разрушение правильно упорядоченной структуры твердого тела, с тепловым движением атомов; но гелий остается жидкостью вплоть до абсолютного нуля и никогда не отвердевает, если только не приложено высокое давление. Мы знаем причины этого. Атомы гелия очень легкие, поэтому для умеренных скоростей их длина волны очень велика; силы притяжения между ними чрезвычайно слабы, так как гелий является благородным газом, не обладающим ни одним из типов химического притяжения, обсуждавшихся нами выше; все это служит причиной, почему гелий остается газом вплоть до чрезвычайно низких температур и конденсируется только при температуре около 5 градусов выше абсолютного нуля. Это значит, что кривая вроде той, что изображена на рис. 40, а, представляющая потенциальную энергию одного атома гелия, должна быть на самом деле очень неглубокой, малость массы приводит к увеличению кинетической энергии, необходимой для того, чтобы заключить волну в область притяжения заданных размеров. Неудивительно поэтому, что притяжение может быть вообще недостаточным для образования связанного состояния, и даже при наименьшей возможной энергии атомы гелия не располагаются в порядке, согласно какой бы то ни было правильной структуре. Другими словами, образованию правильной структуры препятствует здесь не тепловое движение, а нулевая энергия. Жидкий гелий поэтому отличен по своей природе от остальных жидкостей и тем самым представляет собой

интересный объект как для экспериментального, так и для теоретического изучения; однако проблема эта столь сложна, что до настоящего времени еще не все относящиеся сюда вопросы разрешены.

Этих примеров должно быть достаточно для иллюстрации того пути, идя по которому квантовая механика устранила трудности и неопределенности, встречавшиеся до этого при попытках понять структуру вещества. Почти в любых обстоятельствах, встречающихся в повседневной жизни или в лаборатории, изложенные нами законы оказались применимыми для описания свойств атомов, давая результаты в хорошем согласии с наблюдениями. В то же время физики-практики могут использовать их для развития и усовершенствования изобретений, в которых свойства вещества или атомов служат для практических целей или для новых измерений.

Прохождение через потенциальный барьер

В заключение этой главы мы обсудим еще один вопрос, в котором находят применение квантовые законы. Вопрос этот не так уж важен сам по себе, но его изучение поможет нам в понимании одного результата квантовой механики, который будет играть важную роль в последующих главах.

Для начала вернемся на время к частице, движущейся под действием сил притяжения, — к задаче, изображенной на рис. 40, *а* (электронная волна для типичного случая была приведена на рис. 41, *в*). В этой связи мы уже отмечали, что с точки зрения механики Ньютона частица при движении с энергией E находилась бы между точками A и B , так как за этими точками потенциальная энергия превышала бы полную энергию частицы, приводя к отрицательной кинетической энергии. В квантовой механике волновая амплитуда справа от B и слева от A очень быстро убывает; напомним, что волна имеет смысл вероятности, отсюда следует, что частица имеет очень малую вероятность быть обнаруженной за A и B . Существенно, однако, что вероятность проникновения в область, недоступную по старой механике, хотя и мала, но отлична от нуля. Означает ли это, что закон сохранения энергии несправедлив в волновой

механике или что кинетическая энергия частицы в действительности может быть отрицательной?

Решение этого парадокса опять следует из принципа неопределенности. Нельзя применить закон сохранения энергии к какому бы то ни было конкретному положению, измеряя точно кинетическую и потенциальную энергии и складывая их, поскольку для определения одной из них мы должны точно знать положение частицы, а для определения другой — скорость; принцип неопределенности утверждает, что этого сделать одновременно нельзя. Пытаясь поймать частицу в классически «запрещенной» области справа от B , мы должны определить ее положение достаточно хорошо (так как она не уходит далеко за B), что потребовало бы применения метода измерения, способного изменить энергию частицы настолько, что, обнаружив частицу, мы не могли бы уже быть уверены в том, что ее энергия на самом деле меньше, чем потенциальная энергия в точке, где она была обнаружена.

В условиях рис. 40, а вопрос этот является поэтому несколько академическим; он принимает более практическую форму, когда потенциал превышает действительную энергию частицы только на небольших расстояниях, а затем опять спадает. Это приводит к случаю,

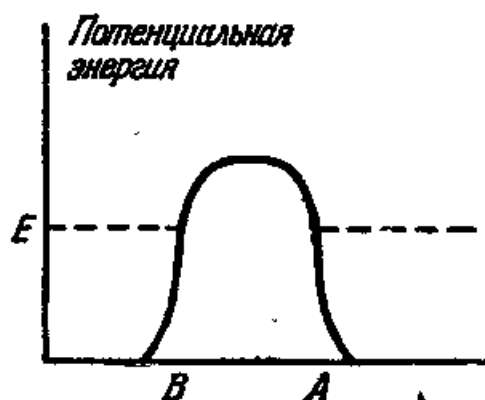


Рис. 56. Потенциальный барьер.

представленному рис. 56, когда в некоторой области существует потенциал, отталкивающий частицу. Имеется, таким образом, барьер, через который в классической механике частица не могла бы пройти, если ее энергия меньше высоты барьера, например, если эта энергия изображена пунктирной горизонтальной линией на рисунке. Согласно квантовой механике, однако, частица имеет малую вероятность проникнуть внутрь барьера и достигнуть другой стороны. Достигнув другой стороны, она может из него выйти. Рис. 57 изображает волну, пришедшую слева на барьер рис. 56. Как и в предшествующих случаях, имеется точка B , где потенциальная и полная энергии равны и где кривизна волны меняет знак. Волна поэтому быстро

убывает, как на рис. 41, в справа от *B*, но это продолжается только до точки *A*, где потенциал опять становится меньше полной энергии и откуда опять возможна волна колебаний, хотя и более слабая, чем слева. Такая картина поэтому показывает, что частица имеет малую вероятность пройти через потенциальный барьер.

Вероятность этого очень быстро падает с возрастанием высоты и ширины барьера. Эта вероятность заметна только тогда, когда ширина барьера, т. е. расстояние от *B* до *A*, не намного больше длины волны частицы, кинетическая энергия которой равна



Рис. 57. Волна в потенциальном барьере, изображенном на рис. 56.

высоте барьера над пунктирной линией на рис. 56. Если ширина барьера, т. е. расстояние от *B* до *A*, как раз равна этой длине волны, через барьер проходит примерно одна частица на полмиллиона; с возрастанием толщины и высоты барьера

вероятность проникновения через барьер быстро убывает. Ясно поэтому, что такое прохождение через барьер следует принимать всерьез только в области атомных явлений. Для больших объектов, когда мы имеем дело с более короткими длинами волн и большими расстояниями, эта вероятность становится фантастически малой.

Типичным примером, в котором проявляется этот процесс, является так называемая холодная эмиссия электронов из металлов. Мы упоминали, что обычный металл содержит электроны, которые и являются ответственными за его способность проводить электричество. В нормальных условиях силы притяжения не позволяют электронам покинуть металл; для того чтобы все же удалить из него электрон, потребовалось бы проделать некоторую работу против этих сил. Электроны могут вырываться, когда металл нагрет до высокой температуры, так как в результате теплового движения они могут приобрести достаточное количество энергии, чтобы преодолеть это притяжение. Это явление используется в горячем волоске обычной радиолампы, нагреваемом настолько, чтобы сделать возможным выход электронов. Можно вырвать электроны из металла и другим способом, помещая металл в сильное

электрическое поле, например употребив его в качестве одной из двух пластинок конденсатора, как на рис. 11. Тогда потенциальная энергия электрона будет выглядеть так, как на рис. 58, изображающем поперечное сечение через поверхность металла. Слева от поверхности S потенциальная энергия постоянна, и электрон с энергией, изображаемой пунктирной линией, может двигаться свободно. При приближении к поверхности S , однако, потенциальная энергия быстро возрастает, поскольку силы притяжения препятствуют электрону выйти наружу. Снаружи металла потенциал опять спадает из-за действия притягивающего электрического поля, и за точкой A движение электрона с энергией E снова становится возможным.

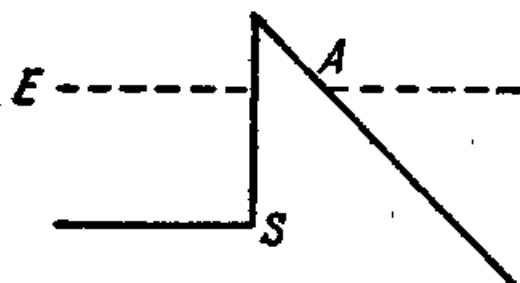


Рис. 58. Холодная эмиссия электронов.

Ясно, что имеется малая вероятность электрону пройти через потенциальный барьер от S до A . Эта вероятность тем больше, чем сильнее приложенное поле, так как линия, соответствующая внешнему потенциалу, наклоняется более круто и точка A ближе придвигается к S . Это уменьшает ширину барьера. Вероятность больше у металла, для которого барьер менее высок, т. е. для которого требуется меньшая энергия, чтобы удалить из него электрон.

«Холодная эмиссия» была хорошо изучена; изменение интенсивности выхода электронов с напряженностью поля согласуется с предсказаниями теории.

Другой полезный способ рассмотрения прохождения через потенциальный барьер состоит в описании этого явления в терминах соотношения неопределенности между энергией и временем; об этом соотношении говорилось в конце главы 7. Там было указано, что энергия не может быть определена точно за короткое время. Если поэтому энергия частицы, вместо того чтобы быть постоянной, на короткое время изменяется на малую величину, мы никогда этого не сможем определить. Грубо говоря, частица может «заимствовать» энергию; если заимствованная величина ϵ , умноженная на время t , по истечении которого заем возвращается, становится меньше h , никакое измере-

ние не может непосредственно показать несоблюдения баланса. В этом смысле можно интерпретировать прохождение электрона через потенциальный барьер: электрон занял необходимое количество энергии, чтобы пройти над барьером; если барьер узкий и это прохождение не длилось долго, он может вернуть заем достаточно быстро, так что никто об этом не узнает.

Возможность «заимствования» энергии окажется важной в последующей дискуссии; она составляет аргумент, который проходит через все проблемы квантовой механики. При обсуждении тех или иных возможных изменений в состоянии электрона или другой частицы мы должны допускать существование таких изменений даже тогда, когда, как кажется, это нарушает закон сохранения энергии, при условии, что это состояние не слишком продолжительно и частица по истечении короткого времени переходит в другое состояние, в котором энергия может быть сбалансирована.

О состояниях, которые могут существовать короткое время, обычно говорят как о «виртуальных» состояниях. Такие виртуальные состояния будут играть роль в дальнейшем.

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРОНЫ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ

Отрицательные энергии. Трудности

При выводе законов квантовой механики в главе 7 мы воспользовались тем, что импульс равен произведению массы на скорость. Это справедливо в старой ньютоновской механике, но неверно при высоких скоростях, когда необходимо учитывать релятивистские поправки. Для электрона, движущегося внутри легкого атома, например внутри атома водорода, они не существенны, так как его скорость много меньше скорости света. Мы видели, что энергия связи электрона в основном состоянии атома водорода равна $\frac{2\pi^2 me^4}{h^2}$. Можно показать, что этой же величине равна и средняя кинетическая энергия электрона. В то же время кинетическая энергия равна $\frac{mv^2}{2}$, а следовательно, средняя скорость есть $v = \frac{2\pi e^2}{h}$. Сравнивая скорость электрона со скоростью света c , мы получаем: $\frac{v}{c} = \frac{2\pi e^2}{hc}$. Это выражение есть безразмерное число, т. е. оно не зависит от того, будем ли мы измерять скорость в сантиметрах в секунду или в милях в час, так как оно представляет собой отношение двух скоростей. Если мы подставим в него известные значения заряда электрона, скорости света и постоянной Планка, то получим число, равное примерно $\frac{1}{137}$. Мы видим, что скорость электрона в атоме составляет меньше чем одну сотую от скорости света. Поэтому в этом случае релятивистские поправки очень малы.

Существуют, однако, задачи, в которых релятивистские эффекты значительны. Одна из них — это задача о движении электрона на K -оболочке тяжелого атома. Это может быть, например, свинец, заряд ядра которого равен 82 зарядам протона. Энергия связи K -электрона в свинце поэтому в $(82)^2$ раз больше, чем в атоме водорода. Та же самая оценка дает для $\frac{v}{c}$ значение, равное $82/137$. Следовательно, электрон движется в этом случае со скоростью, большей, чем половина скорости света, и релятивистские эффекты здесь существенны.

Ускорить электроны до таких и больших скоростей возможно и в лаборатории. Пользуясь результатами главы 6, легко показать, что кинетическая энергия электрона, движущегося со скоростью, близкой к скорости света, будет больше, чем mc^2 , где m — его масса покоя. Чтобы ускорить электрон до такой энергии, необходимо приложить на его пути электрическую разность потенциалов, равную $\frac{mc^2}{e}$, что составляет примерно полмиллиона вольт. Удобно выражать энергию электрона через ту разность потенциалов, которая ускорила бы его до такой энергии, и мы будем говорить, что энергия электрона составляет столько-то электрон-вольт или столько-то миллионов электрон-вольт ($Mэв$). Электрон, ускоренный до нескольких $Mэв$, будет, таким образом, двигаться со скоростью, близкой к скорости света.

Этого можно достичь, либо производя электрический разряд через содержащую электроны вакуумную трубку и прилагая при этом напряжение в несколько миллионов вольт, либо с помощью некоторых более сложных устройств, о которых будет коротко сказано в следующей главе. Кроме того, электроны таких энергий были обнаружены в бета-лучах радия и других радиоактивных элементов. Если мы хотим рассматривать волны, описывающие такие электроны, то мы должны использовать правильную релятивистскую зависимость энергии от импульса. Как было показано в главе 6, эта зависимость имеет вид: $\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m^2c^2$, где E — энергия, включающая энергию покоя, а p — импульс. Это соотношение изображено графически на рис. 59.

Здесь мы встречаемся со специфической трудностью. Квадрат отрицательного числа положителен. Так как наше уравнение определяет только E^2 , мы можем выбрать

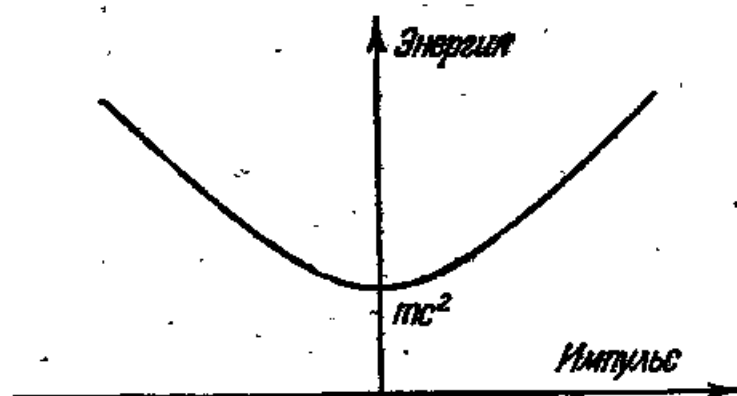


Рис. 59. Энергия и импульс.

E либо положительным, либо отрицательным. Иными словами, две кривые на рис. 60 одинаково совместимы с релятивистским соотношением между энергией и импульсом.

Может ли нижняя ветвь также иметь какое-либо отношение к действительности? Она описывает состояние, в котором полная энергия свободной частицы, будучи отрицательной, уменьшается, если импульс частицы увеличивается, т. е. если частица ускоряется. Такая частица вела бы себя весьма странным образом, так, как если бы она обладала отрицательной массой. Ее ускорение было бы направлено в сторону, противоположную приложенной силе. Если толкнуть ее в одну сторону, она полетит в другую. Если теперь такой электрон приблизится к нормальному электрону, то он будет отталкивать его. Вследствие этого нормальный электрон будет удаляться от электрона с отрицательной энергией. Однако отталкивающая сила нормального электрона заставит эту странную частицу двигаться вслед за ним. Обе частицы стали бы, таким образом, ускоряться в не-

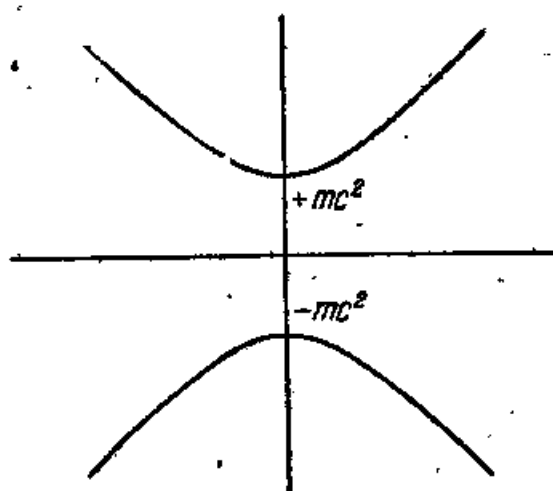


Рис. 60. Энергия и импульс; что означает нижняя ветвь?

котором направлении, причем увеличение кинетической энергии нормального электрона компенсировалось бы увеличением отрицательной энергии другого.

Такое поведение не похоже ни на что, с чем нам когда-либо приходилось встречаться. Если бы такие частицы действительно существовали, материя никогда не могла бы находиться в каком-либо стационарном состоянии, поскольку они всегда могли бы нарушить его, начав двигаться с освобождением энергии.

Эта трудность не является серьезной до тех пор, пока мы не касаемся квантовой механики. Энергия частицы под действием любой мыслимой силы может меняться лишь непрерывно. Поэтому электрон не может перескочить с верхней кривой рис. 60 на нижнюю. Если бы в начальный момент имелись лишь нормальные электроны, то существование нижней кривой ни в чем не проявилось бы.

В квантовой механике положение вещей совершенно иное. Здесь мы более не можем утверждать, что энергия должна изменяться непрерывно, потому что сама энергия не может быть измерена точно за короткое время. Действительно, мы знаем, что атом, обладающий некоторыми определенными уровнями энергии, может переходить с одного уровня на другой с испусканием или поглощением света, причем мы не в состоянии детально описать самый процесс перехода. По той же причине, если только законы квантовой механики принципиально допускают волны, которые соответствуют нижней кривой рисунка 60, мы должны быть готовы к тому, что электрон может перескочить с верхней кривой на нижнюю, точно так же, как он может перескочить с возбужденного уровня атома водорода на основной. Освободившаяся энергия выделится в виде света.

В действительности скачок с верхней кривой рис. 60 на нижнюю не может сопровождаться испусканием лишь одного фотона. Дело в том, что энергия, которая должна быть унесена, всегда больше, чем скорость света, умноженная на импульс, который должен быть унесен. В то же время энергия фотона всегда равна скорости света, умноженной на его импульс. Однако при испускании сразу двух фотонов возможно удовлетворить законам сохране-

ния энергии и импульса одновременно. Более того, электрон в этом случае из некоторого заданного состояния на верхней кривой может перейти в произвольную точку на нижней. При этом его импульс может измениться на сколь угодно большую величину в любом направлении. Если мы попытаемся вычислить вероятность того, что такой переход произойдет до некоторого момента времени, то мы получим бесконечно большую величину. Это означает, что электрон мог бы оставаться на верхней кривой лишь в течение бесконечно короткого промежутка времени и сразу упал бы на нижнюю. Поэтому мы никогда не наблюдали бы обыкновенных электронов, а всегда лишь странные частицы отрицательной массы.

Спин. Позитроны

Дирак попытался устранить эту трудность. Он намеревался найти уравнение для электронных волн, которое отличалось бы от простого обобщения уравнения Шредингера на релятивистский случай. При этом он надеялся, что новое уравнение будет допускать лишь решения, соответствующие верхней кривой на рис. 60. Одновременно он пытался устранить некоторые вызывавшие беспокойство математические трудности в интерпретации релятивистского волнового уравнения.

Эти попытки привели его к необходимости описывать электрон не одной волной, а четырьмя. Аналогичное положение существует в случае электромагнитного поля, которое, как мы видели в главе 2, описывается напряженностями электрического и магнитного полей, каждая из которых характеризуется величиной и направлением и, следовательно, может быть задана ее проекциями на три различные оси. Таким образом, электромагнитное поле полностью определяется шестью величинами.

Следствия из нового четырехкомпонентного уравнения оказались очень интересными. Так, из него следует, что электрон, кроме момента количества движения, обязанного его поступательному движению, имеет еще дополнительный момент, который может относительно любой оси принимать лишь значения, равные $+\frac{1}{2}$ или $-\frac{1}{2}$. Таким образом, оказалось, что спин электрона естественным

образом укладывается в эту релятивистскую картину. Вдобавок оказалось, что магнитное действие спина в два раза сильнее, чем магнитное действие движения электрона, т. е. магнитное действие спина в $\frac{1}{2}$ единицы момента количества движения такое же, как и электрона, вращающегося по орбите с моментом, равным единице. Это уже было отмечено как экспериментальный факт в главе 8.

Теперь очевидно, что четырехкомпонентное волновое уравнение дает совершенно естественное описание электрона. Дальнейшие исследования показали, что рассеяние рентгеновских лучей быстрыми электронами (т. е. эффект Комптона, гл. 7), выбивание электронов из атомов рентгеновскими и гамма-лучами (т. е. фотоэффект при больших энергиях), рассеяние быстрых электронов атомами и много других явлений описываются уравнением Дирака в полном согласии с экспериментом.

Первое время казалось, что уравнение Дирака является единственным способом последовательного описания заряженной частицы. Если бы это было так, то мы могли бы предсказать, что электрон должен обладать спином, даже если бы мы не знали этого заранее из опыта. Теперь известно, что такая точка зрения неверна. Имеется волновое уравнение и для частиц, не обладающих спином, и, как мы увидим в главе 11, бесспиновые частицы действительно существуют.

Остается, однако, еще трудность, касающаяся состояний с отрицательной энергией. Подобно простому волновому уравнению, уравнение Дирака также допускает значения энергии, соответствующие как верхней, так и нижней кривым на рис. 60. Пока эта трудность не устранена, наша теория не имеет права на существование.

К счастью, Дирак обнаружил, что принцип Паули может помочь нам преодолеть эту трудность. Электрон может перескочить в некоторую точку нижней кривой, только если это место не занято уже двумя электронами с противоположными спинами. Что, если все эти состояния заняты? Это смелое предположение означает, что пустое пространство в действительности заполнено электронами в состояниях отрицательной энергии. Их плотность должна даже быть бесконечной, так как эти состояния прости-

раются на бесконечный интервал импульсов. Это приводит к бесконечной плотности отрицательного заряда, что бессмысленно. Но предположим, что на самом деле этот заряд некоторым образом компенсируется плотностью положительного заряда, имеющегося по какой-то иной причине, так что, несмотря на все эти гипотетические электроны, электрического поля в пустом пространстве нет и действительный заряд появляется лишь при отклонении от такого состояния. Тогда наличие электронов в состояниях отрицательной энергии не будет почти ни в чем себя проявлять. Мы уже видели, что электрон может, в принципе, перескочить с верхней кривой на нижнюю; при этом необходимо, чтобы он мог отдать излишнюю энергию и импульс и чтобы на нижней кривой имелось свободное место. Точно так же один из гипотетических электронов отрицательной энергии может перепрыгнуть с нижней кривой на нормально свободную верхнюю, если он получит необходимую энергию и импульс.

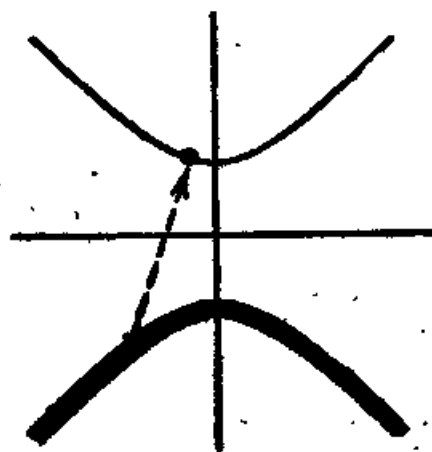


Рис. 61. Рождение пары.

Подобно тому как «прыжок» вниз может происходить с испусканием двух фотонов, электрон может подняться на верхнюю кривую, поглотив два фотона. Но в обычных условиях мы никогда не имеем световых квантов большой энергии в количествах, достаточных для того, чтобы два кванта могли с заметной вероятностью поглотиться одновременно. Возможен и другой механизм. Так, если световой квант пролетит близко от ядра тяжелого атома с его сильным электрическим полем, он один может поднять электрон на верхнюю кривую. Это схематически изображено на рис. 61. В результате перехода мы имеем настоящий электрон на верхней кривой и свободное место на нижней. Что означает это свободное место? Так как было предположено, что отрицательный заряд всех электронов, находящихся на нижней кривой, скомпенсирован, то отсутствие одного из них будет проявляться как отсутствие отрицательного заряда, т. е. как положительный

заряд. Отсутствие частицы с отрицательной энергией означает, что энергия увеличилась. При этом чем больше импульс того состояния, в котором имеется свободное место, или «дырка», т. е. чем большей (по абсолютной величине) отрицательной энергией обладал электрон, первоначально находившийся в этом состоянии, тем больше энергии надо затратить, чтобы породить эту дырку. Следовательно, энергия дырки увеличивается при увеличении ее импульса.

Мы видим, что дырки ведут себя во всех отношениях подобно электронам с положительной энергией и положительным зарядом. Если такая картина правильна, то следует ожидать, что в природе, кроме обычных электронов, существуют также положительные электроны, отличающиеся от обычных лишь знаком заряда.

Мы видели, что фотон, пролетая мимо тяжелого атома, может вызвать переход, показанный стрелкой на рис. 61, т. е. породить пару электронов: один положительный, один отрицательный. Наименьшая энергия, которой должен обладать фотон, чтобы вызвать такой переход, равна расстоянию между высшей точкой нижней кривой и низшей точкой верхней. Эта энергия равна $2mc^2$, т. е. примерно 1 Мэв.

Наоборот, если электрон и позитрон (или, иначе говоря, электрон на верхней кривой и дырка на нижней) встретятся, то электрон может провалиться в эту дырку, и все вернется к нормальному состоянию пустого пространства. Это может произойти или вблизи атома с испусканием одного фотона, или с испусканием двух фотонов, если электрон и дырка встретятся в свободном пространстве. Если электроны двигались очень медленно, то фотоны будут иметь равные по величине и противоположные по направлению импульсы, т. е. вылетят в противоположных направлениях. Каждый из них будет иметь энергию, равную примерно $\frac{1}{2}$ Мэв.

Эти соображения подтвердились, когда положительные электроны были открыты в лаборатории. Если пропускать гамма-лучи с энергией более 1 Мэв через помещенную в откачанную трубку тонкую (скажем, свинцовую) фольгу, то будет казаться, что фольга испускает

электроны. Некоторые из этих электронов отклоняются магнитным полем в одном направлении, другие — в противоположном. Это означает, что часть электронов имеет положительный заряд. Если положительные электроны останутся в веществе, то можно заметить гамма-излучение из того места, где они останавливаются. Было измерено, что энергия каждого гамма-кванта равна примерно $\frac{1}{2} M_{\text{эв}}$. Современные счетчики, которые реагируют на отдельные фотоны, можно использовать для доказательства того, что всегда одновременно вылетают в противоположных направлениях два гамма-кванта.

Сами по себе положительные электроны, или позитроны, как их теперь называют, ведут себя в точности так же, как и отрицательные. Однако в веществе они живут недолго, так как там имеется много отрицательных электронов, с которыми они могут соединяться и аннигилировать, причем их энергия превращается в излучение. Поэтому неудивительно, что они обычно отсутствуют там, где нет излучения высокой энергии, которое способно их образовывать.

Действительно, представим себе, что в некоторый момент имеется большое количество как положительных, так и отрицательных электронов, причем электронов одного какого-нибудь знака несколько больше. Тогда электроны противоположных знаков, встречаясь, будут аннигилировать и заменяться излучением, и так до тех пор, пока не останутся лишь электроны одного знака.

Явления порождения и аннигиляции электронных пар интересны, в частности, тем, что они подтверждают идею Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии в том смысле, что в этом случае масса покоя частиц также переходит в другие формы энергии.

Если встретятся медленно движущиеся электрон и позитрон, то под влиянием сил электрического притяжения они могут начать вращаться один относительно другого прежде, чем произойдет их аннигиляция. В течение этого времени они будут составлять атом, подобный атому водорода, с той разницей, что в нем протон заменен позитроном, имеющим ту же массу, что и электрон. Поэтому в отличие от атома водорода, где электрон вращается

вокруг гораздо более тяжелого протона, здесь обе частицы будут вращаться вокруг общего центра тяжести. Такую комбинацию, живущую, разумеется, лишь очень короткое время, называют атомом позитрония. Несмотря на его короткое время жизни, искусно поставленные эксперименты позволили не только доказать его существование и измерить время жизни, но даже детально изучить его энергетические уровни.

Все успехи «дырочной» теории не снимают, однако, того возражения, что картина бесконечной плотности электронов в состояниях отрицательной энергии, от которой мы отпирывались, не слишком удовлетворительна. Ответом на это возражение является то, что эта картина использовалась выше только для того, чтобы помочь нам найти правильный подход к проблеме. Если мы хотим полностью описать состояние, в котором имеются электроны и позитроны, мы в действительности можем не вводить электроны в состояниях отрицательной энергии, а указать лишь, сколько имеется электронов и дырок, т. е. позитронов, и как они движутся. Здесь важно то, что существующие законы не приводят к переходам электронов или позитронов в состояния с бессмысленным поведением, о которых речь шла ранее. Вместо этого эти законы предсказывают возможность образования пар и их аннигиляции. Без этих парных процессов невозможно устранить бессмысленные виды переходов. При этом простая картина рис. 61 полезна для объяснения того, как это происходит.

Силы при больших скоростях. Другие трудности

Мы видели, что четырехкомпонентные волны Дирака описывают движение свободных электронов или позитронов и их поведение в статических силовых полях. Но мы встретимся с новыми проблемами, если попытаемся описать взаимодействие между электронами, движущимися со скоростью, близкой к скорости света. При этом важно помнить, что электромагнитное поле, которое передает силы от одной частицы к другой, переносит возмущения только со скоростью света. Если частицы движутся быстро, то на первую частицу будет действовать сила, оп-

ределяющаяся не тем, где в данный момент находится вторая частица, а тем, где она была незадолго до этого. Точно так же, наблюдая за быстро летящим над нами самолетом, мы слышим его звук приходящим не из того места, где самолет находится в настоящий момент, но из точки позади него, где он был в то время, когда излучал звук, который достиг нас теперь.

Такое отставание называют запаздыванием сил. При этом, чтобы учесть квантовые эффекты, мы должны приложить квантовые законы также и к электромагнитному полю, т. е. должны описывать его посредством фотонов.

Силы, с которыми одна заряженная частица действует на другую, создаются поэтому следующим образом: одна из частиц может испустить один или несколько фотонов, которые затем могут быть поглощены другой частицей. Но для испускания фотонов требуется энергия, а частица может не иметь достаточного запаса энергии, если она, например, покоится. Вспомним, однако, о замечании, которое мы сделали в конце главы 8: квантовая механика позволяет «занять» энергию на короткое время или на малое расстояние. Таким образом, если два заряда находятся близко друг от друга, то возможно занять достаточно энергии, чтобы породить как длинноволновые, так и коротковолновые фотоны, так как в этом случае фотоны будут поглощаться поблизости, и заем может быть возвращен сразу. С другой стороны, если частицы находятся далеко друг от друга, то может быть занято лишь малое количество энергии, и в процесс будут вовлечены лишь фотоны с большими длинами волн. Частицы, существующие «в кредит», принято называть виртуальными фотонами, чтобы отличить их от реальных, которые могут испускаться на самом деле. Таким способом, с помощью квантовой теории электромагнитного поля можно вывести закон Кулона, по которому взаимодействуют два покоящихся заряда. Те же рассуждения можно приложить и к более сложному случаю взаимодействия быстро движущихся зарядов. Законы испускания и поглощения, необходимые для этого, точно те же, что и законы реального поглощения и излучения света атомами, о которых мы упоминали выше.

В этом месте появляется новая трудность. Даже одна частица может испускать и вновь сама же поглощать фотоны. Так как в этом случае не возникает вопроса о расстоянии, не возникает и вопроса о минимальном времени, необходимом для возврата займа. Поэтому не существует предела для энергии фотонов, которые частица может испустить и вновь поглотить. Если учесть все эти возможности, то в результате получится бесконечное изменение энергии частицы, известное под названием «собственная энергия».

Эта трудность не является неожиданной. Даже с точки зрения, изложенной в главе 2, где мы видели, что плотность энергии электромагнитного поля пропорциональна квадрату его напряженности, энергия электрического поля вблизи точечного заряда должна быть бесконечно велика. Действительно, если «размазать» заряд e по малой сфере радиуса a , то можно вычислить, что энергия, заключенная в электрическом поле, окажется равной $\frac{3}{5} \frac{e^2}{a}$. Если мы будем теперь уменьшать объем сферы, т. е. сделаем a очень малым, то энергия становится очень большой. Поэтому неудивительно, что теория предсказывает бесконечную энергию поля, окружающего частицу, заряд которой сконцентрирован в точке.

Эта трудность была известна задолго до квантовой механики, и наиболее естественный путь ее устранения заключается в том, чтобы рассматривать электрон не как математическую точку, а как имеющую конечный объем частицу.

Такие идеи высказывались, в частности, Г. А. Лорентцем, известным своими работами, которые подготовили почву как для теории относительности, так и для теории электронов.

Однако и точку зрения протяженного электрона трудно провести последовательно. Дело в том, что теория относительности не допускает существования твердых тел. Причину этого можно легко увидеть. Предположим, что я нанесу резкий удар по одному из концов твердого тела. Тогда, так как оно не может сжиматься, его другой конец должен сразу же прийти в движение, а следовательно, удар передастся от одного конца к другому мгновенно. Но

если этот же процесс рассматривается другим наблюдателем, движущимся с большой скоростью, то согласно закону преобразования Лорентца для него второй конец начнет двигаться раньше, чем удар был нанесен, так что следствие будет предшествовать причине, что бессмысленно. В действительности, согласно теории относительности, никакое возмущение не может быть передано со скоростью, превышающей скорость света. С другой стороны, если ближний конец тела может начать двигаться раньше, чем дальний, то тело должно быть хотя бы немного сжимаемым. Это выполняется в случае всех существующих твердых тел, например в случае стального бруска. Если мы ударим молотком по одному концу стального бруска, то брусок несколько поддастся, и пройдет некоторое время, прежде чем это сжатие дойдет до другого конца бруска. Скорость, с которой оно будет перемещаться, есть скорость звука в стали, составляющая по порядку величины несколько сот метров в секунду. Это очень большая скорость для практических целей, но она еще очень мала по сравнению со скоростью света.

Эти соображения объясняют, почему трудно описывать поведение абсолютно твердых тел, не нарушая принципа относительности. Все более поздние попытки рассматривать электрон как твердый шарик конечного размера провалились, хотя даже и сегодня некоторые уверены, что были испробованы еще не все разумные возможности в этом направлении.

Имеется и другая возможность, а именно: можно предположить, что электрон в действительности сжимаем. Любое сжимаемое тело способно к внутренним колебаниям. В случае стального стержня в этом легко убедиться, ударяя по нему молотком. При этом он издает громкий звон, который является результатом вибраций. Аналогично можно ожидать, что электрон при столкновении с другими частицами сможет прийти в колебательное движение и, следовательно, может переносить энергию, кроме кинетической энергии его движения. Это привело бы на опыте к существованию возбужденных состояний электронов, точно так же, как возможность внутренних движений в атоме приводит к существованию возбужденных состояний атома. При тщательном изучении столкновений, в

которых участвуют электроны очень больших энергий, не было получено никаких указаний на существование таких возбужденных состояний. Возможно, что они существуют при гораздо больших энергиях, чем те, которыми мы располагаем в настоящее время. Но, поскольку мы ничего не знаем о природе таких состояний, их введение имело бы слишком спекулятивный характер.

Так как ни в одном эксперименте с электронами до сих пор не было обнаружено никаких особенностей в их поведении, которые указывали бы на какую-либо внутреннюю структуру электрона, то остается очень сомнительным, имеет ли вообще вопрос о такой структуре какой-либо заметный смысл, т. е. может ли такая структура быть связана с какими-либо наблюдаемыми эффектами.

Новые методы. Лэмбовский сдвиг

В течение длительного времени казалось, что всякий дальнейший прогресс в теории электрона невозможен, пока остаются неразрешенными эти вопросы, так как детальное рассмотрение взаимодействия электронов через электромагнитное поле всегда приводит к бесконечным ответам, вследствие того, что энергия, содержащаяся в окружающем электроны поле, бесконечно велика. В последние несколько лет, однако, новые исследования показали, что, несмотря на все трудности, могут быть получены дополнительные сведения. Чтобы увидеть это, рассмотрим снова случай малого, но конечного электрона, хотя, как я уже указывал, такая картина не может быть согласована с требованиями теории относительности. Такой электрон, находясь в покое, был бы окружен своим электромагнитным полем, и энергия поля добавилась бы к энергии покоя $m_0 c^2$ электрона, где m_0 — масса покоя электрона. Вследствие эквивалентности массы и энергии увеличение энергии есть то же самое, что и увеличение массы. Поэтому электрон и поле вместе будут иметь массу $m_1 = m_0 + m'$, где m' — энергия поля, деленная на c^2 .

Здесь важно то, что мы всегда наблюдаем электрон только вместе с сопровождающим его полем, так что общая масса m_1 должна быть отождествлена с реально наблюдаемой массой. Эта полная масса m_1 измерима и из-

вестна нам, в то время как отдельные ее части m_0 и m' неизвестны и даже, возможно, в отдельности не имеют определенного физического смысла. Если мы теперь будем уменьшать радиус электрона, то полевая часть массы m' , как мы видели, будет увеличиваться. Так как общая масса задана, это означает, что m_0 надо считать тем меньшей, чем меньше радиус. Если мы предположим, что радиус очень мал, электромагнитная масса может превысить полную массу реального электрона. Тогда «механическую» массу следует считать отрицательной. Частица отрицательной массы сама по себе, как мы уже видели, — вещь довольно странная, но при условии, что она всегда сопровождается электромагнитным полем, так что общая масса всегда положительна, никаких бессмысленных следствий из этого не получается.

Мы, следовательно, будем стараться описывать поведение электрона не посредством механической массы m_0 и электромагнитной массы m' , но посредством общей массы m_1 . Тогда можно надеяться, что все результаты останутся верными, даже если мы перейдем к предельному случаю точечного заряда, хотя при этом m' должна стать бесконечной, а следовательно, m_0 — бесконечной и отрицательной.

Вспомним теперь, что электромагнитная масса пропорциональна энергии окружающего электрона электромагнитного поля, которая в квантовой механике связана с тем, что электрон может «занять» энергию, чтобы на короткое время испустить световой квант и затем вновь поглотить его. Теперь рассмотрим такой электрон, движущийся не свободно, а вблизи силового центра, например в атоме водорода. Тогда за время между испусканием и поглощением фотона электрон может изменить свою скорость под влиянием приложенной силы. Процесс испускания и поглощения фотонов, а следовательно, и электромагнитная масса m' , меняется, таким образом, под влиянием приложенных сил. Но это изменение будет связано главным образом с длинноволновыми фотонами, так как коротковолновые фотоны требуют большой энергии и согласно соотношению неопределенности могут существовать только очень короткое время. За такое короткое время внешняя сила не может существенно ускорить

электрон. Поэтому, хотя сама электромагнитная масса m' бесконечно велика для точечного электрона из-за влияния фотонов очень короткой длины волны, величина, на которую она изменяется поблизости от силового центра, остается конечной даже для точечного электрона.

Из таких соображений следует наличие малых поправок к энергетическим уровням атома водорода. Они различны для разных уровней, так как их величина зависит от вероятности для электрона подойти близко к протону, которая различна для различных уровней.

Интересно отметить, что изложенное развитие теории началось не с абстрактных домыслов, а с открытия необъяснимых аномалий в водородных уровнях. Они были обнаружены с помощью новой экспериментальной техники, развитой Лэмбом и его сотрудниками в Колумбийском университете (Нью-Йорк).

Чтобы оценить, насколько сложна была проблема с экспериментальной точки зрения, мы должны вернуться к энергетическим уровням атома водорода, например к рис. 49. Там мы рассматривали решения нерелятивистского уравнения Шредингера. В этом случае энергия определяется квантовым числом n , которое было равно 1 для основного состояния и 2 для первого возбужденного состояния. При $n=2$ электрон, как мы видели, может двигаться двумя различными способами — с моментом количества движения, равным 0, и с моментом количества движения, равным единице. В водороде оба эти состояния должны иметь в точности равную энергию, которая лежит примерно на 10 эв выше, чем энергия основного состояния. Это рассмотрение не учитывает спина электрона. На самом деле из-за наличия спина энергия состояния с моментом количества движения, равным 1, слегка меняется в зависимости от того, происходит ли спиновое вращение электрона в том же направлении, что и его обращение по орбите, или в противоположном. Эта разность, так называемая тонкая структура водородных уровней, может быть вычислена из уравнения Дирака, так как оно дает естественное описание спина. Она оказалась равной 1/200 000 эв. В прошлом эта разность обнаруживалась по наличию двух близких линий в спектре водорода. Ясно, что для того, чтобы обнаружить, а тем более

измерить столь малое расстояние между линиями, необходимы очень тщательные спектроскопические измерения.

Новый метод состоял в непосредственном наблюдении переходов между этими близкими линиями. Так как разность энергий очень мала, то соответственно мала частота световых квантов, поглощаемых при переходе. В действительности мы здесь имеем дело не со светом в обычном смысле слова, а с короткими радиоволнами, с длиной волны примерно 20 см. Устройства для получения таких «микроволн» интенсивно разрабатывались во время войны в связи с работами по радиолокации. Однако подробное рассмотрение экспериментов завело бы нас слишком далеко в сторону. С помощью таких радиоволн возможно вызвать переход между двумя водородными линиями тонкой структуры. Частота, для которой такой переход будет иметь место, дает тогда непосредственно энергию фотонов, вызывающих переход, а следовательно, разность энергий. Результаты измерений не совпали с тем, что ожидалось. Была обнаружена небольшая разность энергий между теми уровнями, которые по теории должны были строго совпадать. Физики начали искать причину расхождения.

Возобновилось изучение того, каким образом электрическое поле электрона влияет на его движение, и в результате были развиты новые методы, которые я описал выше. С помощью этих новых методов оказалось возможным точно вычислить, какова должна быть разность энергий, и эта разность с точностью до нескольких десятитысячных совпала с наиболее точными экспериментами.

Это был замечательный успех и эксперимента, и теории. Вскоре после этого был открыт другой столь же тонкий эффект: оказалось, что магнитное поле вращающегося электрона отличается на три тысячных от того, что требуется простым уравнением Дирака. Это также было объяснено Швингером на основе представлений о виртуальном испускании и поглощении фотонов.

Очень точное подтверждение теории этими и другими способами показывает, что наш нынешний подход к проблеме электрона и его поля находится на верном пути. Несмотря на это, кажется вероятным, что по крайней мере форма, в которой эти законы до сих пор выражались, не

является еще окончательной, поскольку, как мы видели, в такой форме они предсказывают бесконечную собственную энергию электрона, которая сокращается, лишь если предположить существование бесконечной отрицательной механической массы. Может быть, что такое деление на механическую и электромагнитную массу не имеет смысла и что те же самые законы могут быть выражены в форме, в которой не появляются отдельно эти две части массы. Можно представить себе, что такая переформулировка приведет все же к точно тем же результатам, что и современная процедура. Но это еще необходимо доказать.

Подчеркнем, что все усложнения, происходящие от взаимодействия электрона с его собственным полем, носят характер очень малых поправок и требуют экспериментов очень высокой точности только для того, чтобы быть замеченными. Причина этого заключается в том, что величина собственной энергии определяется числом $\frac{2\pi e^2}{hc}$ (где e — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света), которое равно всего лишь $\frac{1}{137}$. Это число входит, когда мы, например, оцениваем вероятность испускания света возбужденным атомом. Оказалось, что вероятность испускания фотона за время, равное периоду обращения электрона в возбужденном атоме, равна примерно $\frac{1}{137} \left(\frac{v}{c} \right)^2$, где v — скорость электрона. Мы видели, что для водорода и для электронов примерно таких же энергий в других атомах $\frac{v}{c}$ опять около $\frac{1}{137}$. Следовательно, электрон имеет только один шанс из $(137)^2$ испустить фотон за один оборот. Он совершит в среднем около $(137)^2$ оборотов, прежде чем упадет с испусканием света на нижний уровень. Это означает, что с очень хорошей точностью мы можем рассматривать электрон так, как если бы не существовало вероятности испускания фотона. Это же число появляется снова при рассмотрении вопроса о виртуальном поглощении и испускании фотонов, так что поправки на испускание и поглощение виртуальных фотонов также малы. Далее, при рассмотрении этих поправок мы не учитывали того, что существует вероятность, что электрон испустит второй фотон раньше,

чем будет поглощен первый. Таким образом, мы рассматривали одновременно лишь один виртуальный фотон. Поправки, обязанные одновременному присутствию двух или более фотонов, составляют самое большее 1% от однофотонных поправок.

Тот факт, что «постоянная тонкой структуры» $\frac{2\pi e^2}{hc}$ так мала, сильно помогает нам, следовательно, в изучении проблем электрона. В главе 11 мы встретимся с аналогичными проблемами, в которых, однако, соответствующее число не мало. Это создает серьезные трудности, которые до настоящего времени сильно задерживают изучение этих вопросов.

ГЛАВА 10

АТОМНОЕ ЯДРО

Радиоактивность. Альфа-распад

Во всех предыдущих главах нашей целью являлось нахождение законов природы, управляющих поведением объектов и веществ, которые встречаются в практической жизни. Поиски этих законов указали нам на существование атомов и привели к изучению их внутренней структуры и свойств.

Законы квантовой механики вместе со старыми законами механики, электричества и магнетизма позволили вывести все характеристики атомов из представления, что атом содержит ядро, несущее положительный заряд, который обычно компенсируется отрицательным зарядом электронов, окружающих ядро. Таким путем стало возможным описать почти во всех деталях атомы и, следовательно, также материю, состоящую из атомов. Это позволяет нам не только понимать происходящее в обычной материи, но также применять эти знания для использования материи в практических целях.

Теперь мы можем понять, почему одни вещества тяжелые, а другие легкие, почему одни легко подвергаются коррозии под действием химикатов, а другие устойчивы, одни тверды, а другие мягкие. Мы знаем, почему и как металлы проводят электрический ток, почему некоторые вещества являются хорошими проводниками тепла, почему некоторые соли окрашены, а другие светятся различными цветами, если их облучать невидимым ультрафиолетовым светом.

Однако некоторые вопросы остаются нерешенными. Прежде всего это касается ядра атома. Каковы различия между ядрами столь различных 92 элементов, известных в природе? Как можно объяснить их разницу в весе? Почему, например, ядро кислорода и, следовательно, атом кислорода примерно в 16 раз тяжелее ядра водорода, и почему атомный вес свинца более чем в 200 раз превышает атомный вес водорода?

Эти вопросы прямо приводят нас к изучению того, что происходит в атомном ядре. Они являются частью нашего знания об основных законах природы, и на них нужно ответить, прежде чем считать, что наше описание явлений природы является полным. Однако вообще говоря, тот или иной ответ на эти вопросы не затронет свойств материи в обычных условиях. Можно думать, что в изучении ядра нет необходимости, если речь идет об использовании законов природы для практических целей, поскольку во всех практических применениях для физика, химика или инженера атомные ядра играют лишь роль постоянной, неизменяемой части, которая после любых химических процессов или изменений температуры, после любых механических воздействий, любых электрических или магнитных изменений остается такой же, как и вначале.

Изучение атомного ядра было предпринято только для удовлетворения интеллектуального любопытства, но, как это знает каждый читатель, оказалось, что существуют особые условия, в которых стало возможным освобождать большие количества энергии из атомного ядра. Благодаря открытию того, что теперь называется атомной энергией, понимание строения атома оказалось имеющим большие практические следствия.

Фактически, однако, при изучении ядра мы говорим о явлениях, которые обычно не обнаруживают себя в нашем повседневном опыте. Говоря об атомах, мы можем иллюстрировать наши заключения, рассматривая таяние льда или кипение воды, действие магнита или цвет свечения неоновой трубки. Проблемы же ядра возникают лишь в опытах физика, использующего специальные устройства для исследования ядра. Открытие атомной энергии не изменяет существенно этого положения, поскольку работа электростанции на атомной энергии начнется в ближайшем

будущем*), а взрывы атомной бомбы, мы надеемся, никогда не станут нашим повседневным опытом.

Поэтому необходимо подробнее, чем в предыдущих главах, указать на важнейшие эксперименты, из которых выводятся наши представления о ядре, и упомянуть об устройствах для получения и обнаружения быстрых частиц. Бурное усовершенствование этих устройств за последние двадцать пять лет сделало возможным изучение ядра.

Возникновение физики ядра связано с радиоактивностью. Мы упоминали уже в главе 4 о радии, уране и других элементах, извлекаемых из минералов, испускающих излучение трех типов, в том числе альфа-лучи, которые Резерфорд использовал при изучении строения атома. Мы видели, что альфа-лучи оказались потоком положительно заряженных частиц, масса и заряд которых такие же, как и у ядра гелия. Откуда они исходят? Применяемая химическая очистка радия позволяет утверждать, что в смеси с ним гелия нет; единственным местом, где столь тяжелые положительно заряженные частицы могут существовать, не изменяя химических свойств атома радия, является его ядро. Это было подтверждено опытами, доказавшими, что химические изменения, воздействующие на движение внешних атомных электронов, не могут ускорять, замедлять или как-нибудь изменять альфа-радиоактивность.

Как только появились современные представления о структуре атома, стало ясно, что мы имеем дело с распадом атомного ядра, когда одна его часть выбрасывается наружу с очень большой скоростью. Тщательные наблюдения показали, что активность, т. е. интенсивность излучения данного количества радия или любого другого радиоактивного элемента, уменьшается с течением времени. В случае радия это уменьшение весьма медленное: интенсивность альфа-радиоактивности уменьшается вдвое лишь за 1600 лет. Но, например, для так называемой эманации радия, газа, который был найден вместе с радием

*) Первая в мире электростанция на атомной энергии мощностью 5000 квт была пущена в Советском Союзе в 1954 г. В настоящее время у нас разворачивается строительство более мощных электростанций. (Прим. перев.)

по причинам, о которых мы узнаем в дальнейшем, активность уменьшается вдвое приблизительно через четыре дня. Предположим, что мы отделили от радия некоторое количество эманации, запаяли ее в тонкостенную трубку и можем наблюдать альфа-частицы, проходящие через стенки. Примерно через четыре дня наружу станет выходить вдвое меньше лучей, чем вначале, но сами они ни в какой степени не будут отличаться от тех, которые мы имели в первый час. Единственный способ объяснения — это признать, что все ядра эманации одинаковы и неразличимы, но каждое из них неустойчиво и способно распасться; в среднем это случается в секунду лишь с двумя из каждого миллиона таких ядер.

Мы можем описать это следующим образом. Предположим, что мы имеем много маленьких ящиков, каждый из которых состоит из большого числа отсеков, соединенных сложными переходами, и имеет только один выход, так что каждый образует лабиринт. В каждом из ящиков мы поместим по насекомому и будем считать, что оно блуждает, не зная дороги и не будучи способным использовать свой предыдущий опыт. Одно из них случайно может найти выход и выйти наружу, но те, которые выхода не нашли, будут продолжать блуждать, и их шанс выйти наружу будет не больше и не меньше, чем вначале. Если спустя несколько дней половина из них окажется снаружи, оставшаяся половина будет в том же положении, что и сначала; по истечении такого же периода времени наружу выйдет половина из них и останется занятой лишь четверть ящиков, и так далее. Аналогично, наше количество эманаций радия уменьшится вдвое по истечении первых четырех дней, по истечении еще такого же периода времени оно уменьшится до одной четверти, потом до одной восьмой, одной шестнадцатой первоначального количества, и так далее.

Что делается с ядром, из которого выбрасывается альфа-частица? Мы знаем, что электрический заряд и масса сохраняются. Поскольку альфа-частица несет учетверенную массу протона и удвоенный его заряд, остаток будет ядром с зарядом, на две единицы меньшим, и массой, на четыре единицы меньшей, чем ядро эманации. Такое ядро образует атом, который вместо 86 электронов эмана-

ции радия содержит лишь 84, и это придает ему иные химические свойства. Таким образом, мы имеем дело с превращением одного химического элемента в другой. Это подтверждается химическими исследованиями.

Это означает, что мы должны полностью оставить идею об атомах как о неделимых и неизменяемых объектах. Мы уже видели в предыдущих главах, что эта идея неприменима к атому как к целому. Прежде нам не приходилось встречаться с изменением самого ядра; мы могли изменять число электронов вокруг ядра, но в этом случае остающийся электрический заряд приводил к восстановлению требуемого числа, и атом возвращался к своей естественной форме. Здесь же мы имеем дело с изменением природы самого ядра и, следовательно, вида атома, который оно образует.

Во многих случаях ядро, остающееся после радиоактивного процесса, само радиоактивно, т. е. в свою очередь оно испускает еще альфа-частицу или излучение какого-либо из других типов, которые мы рассмотрим в дальнейшем. Это было замечено благодаря тому факту, что если, например, мы будем иметь вначале очень чистый радий и откачаем всю эманацию, которая может сопровождать его, через некоторое время снова обнаружится эманация, которая дает знать о себе испускаемыми альфа-частицами и которая снова может быть откачана как газ. Мы заключаем, что эманация есть «продукт распада» радия, т. е. ее ядра как раз те, которые остаются после того, как ядро радия потеряет альфа-частицу. Продукт распада эманации снова радиоактивен. Таким образом были обнаружены три радиоактивных семейства; каждый их член есть продукт распада предыдущего.

Скорости, с которыми альфа-частицы вылетают в этих реакциях наружу, очень велики. Общепринято измерять кинетическую энергию частиц в миллионах электрон-вольт (*Мэв*). 1 *Мэв* — это энергия, которую приобретает электрон (или частица с зарядом, равным заряду электрона), проходя через разность потенциалов в один миллион вольт. Для сравнения укажем, что энергии внешних электронов в атомах равны, как мы видели, нескольким электрон-вольтам. Энергий альфа-частиц от радиоактивных веществ — порядка нескольких *Мэв*; например, в слу-

чае радия они очень близки к 5 Мэв. Вспоминая, что кинетическая энергия есть $1/2 mv^2$, где m — масса, а v — скорость, мы видим, что, хотя масса альфа-частицы больше 7000 электронных масс, скорость ее более чем в 10 раз превышает скорость электрона в атоме водорода. Следовательно, мы имеем дело с очень большими по атомной шкале энергиями. Не следует, конечно, забывать, что для практических целей это все еще очень малые количества энергии, поскольку мы не привыкли иметь дело с отдельными атомами.

Если бы мы могли воздействовать на распад радия таким образом, чтобы заставить распасться одновременно все атомы радия, содержащиеся, например, в 20 грамах, то это освободило бы в миллион раз больше энергии, чем при происходящем с тем же количеством атомов химическом процессе, например сжигании одного грамма угля. Но это лишь праздное измышление: мы пока ничего не можем сделать, чтобы ускорить распад радия, и поэтому его энергия выделяется не моментально, а лишь через период времени во много тысяч лет. Для короткоживущих веществ, подобных эманации, эта энергия выделяется в более приемлемое время, но именно поэтому непрактично накапливать количества эманации порядка граммов, потому что она образуется из радия чрезвычайно медленно и распадается почти мгновенно после образования.

Волновая механика решает другой парадокс

Энергия альфа-частиц не столь велика, как можно было бы ожидать, и в ранней работе Резерфорда это обстоятельство проявилось как некоторая трудность. Альфа-частица, выходящая из ядра, с самого начала является объектом отталкивания одноименных зарядов, которые ускоряют ее. Если нам известно, откуда она стартовала, то закон сохранения энергии позволит найти, какую кинетическую энергию она приобретет. Согласно закону Кулона потенциал на расстоянии r от заряда в Z электронных зарядов есть $\frac{Ze^2}{r}$, а потенциальная энергия альфа-частицы, которая сама несет положительный заряд $2e$, должна

быть поэтому $\frac{2Ze^2}{r}$. Это должно равняться кинетической энергии, приобретаемой альфа-частицей на ее пути. Из значения энергии альфа-частицы по выходе из ядра следует, что она не могла начать своего пути с расстояния, меньшего чем примерно $6 \cdot 10^{-12}$ см, если считать, что даже на столь близких расстояниях силы, действующие между ядром и частицей, еще подчиняются закону Кулона. Но оригинальные эксперименты Резерфорда по отклонению альфа-частиц, проходящих через вещество, показали, что закон Кулона в действительности справедлив вплоть до гораздо меньших расстояний, чем это, и на основании современных повторений этих экспериментов мы знаем теперь, что радиус даже самых больших ядер составляет лишь $1 \cdot 10^{-12}$ см, другими словами, в 6 раз меньше, чем расстояние, с которого должна начать свой путь покоящаяся альфа-частица, чтобы выйти наружу с той скоростью, с которой она выходит.

Это столь же удивительно, как если бы мы обнаружили мяч (для игры в гольф), упавший с легким стуком к нашим ногам, и, посмотрев вверх, чтобы узнать, откуда он упал, не увидели бы над собой ничего, кроме моста высотой в 100 футов. Казалось бы, что он не мог упасть с высоты, меньшей чем в 100 футов, но если бы его уронили с моста, то он ударился бы о землю гораздо более сильно.

Трудность оставалась нерешенной, пока не были открыты законы волновой механики, и тогда Гамовым, Кондоном и Герни было показано, что радиоактивность есть как раз пример прохождения через потенциальный барьер, которое обсуждалось в конце главы 8. Положение вещей иллюстрируется рис. 62, на котором потенциальная энергия альфа-частицы отложена в функции ее расстояния от ядра. На не слишком близких к ядру расстояниях единственной силой является электрическое отталкивание и основная часть кривой представляет эффект закона Кулона. Потенциальная энергия возрастает по направлению к ядру, потому что, приближая заряд к ядру, мы должны преодолеть электрическое отталкивание. На очень малых расстояниях в игру вступают иные силы, о которых мы поговорим позднее; они приводят к притяжению. По этой

причине кривая вновь резко падает. Детали ее внутри ядра для нас сейчас несущественны. Теперь, если действительной энергии альфа-частицы соответствует пунктирная линия на рисунке, A будет снова обозначать точку, откуда частица начинает движение из состояния покоя, чтобы благодаря отталкивающим силам вылететь наружу с необходимой кинетической энергией. Она не может прийти ни из какой точки между A и B , но слева от B снова существует район, где она могла бы двигаться с заданной энергией. Можно видеть, что в сущности положение вещей такое же, как и на рис. 55, и поэтому мы имеем дело со случаем, когда квантовая механика предсказывает частице с указанной энергией, находящейся слева от B , небольшую вероятность вылететь через потенциальный барьер наружу.

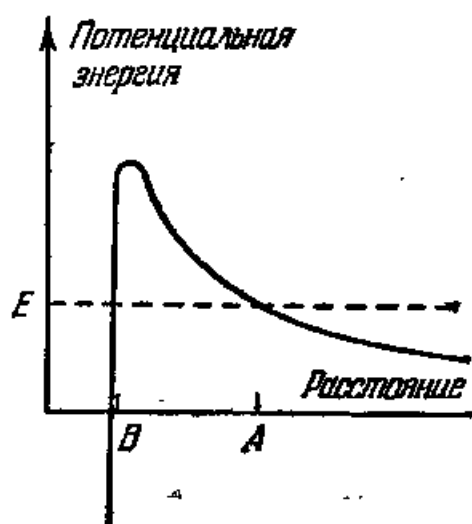


Рис. 62. Альфа-распад.

Этот довод объясняет не только то, что частицы такой сравнительно малой энергии способны вылететь из небольшого ядра, но и то, что вероятность этого процесса должна быть очень мала, если потенциальный барьер достаточно высок и широк. Это объясняет также, почему за короткое время претерпит распад лишь очень малая доля ядер.

В нашем примере с насекомыми в лабиринте потенциальный барьер занимает место лабиринта. Очевидно, что шанс вылететь наружу будет меньше для альфа-частиц низшей энергии, потому что, если мы понижаем пунктирную линию на рис. 62, высота барьера, т. е. высота сплошной линии над пунктирной, возрастает, и одновременно возрастает ширина барьера, т. е. расстояние от B до A . Легко вычислить период полураспада, т. е. время, которое нужно ожидать, чтобы распалась половина атомов, а также его изменение с наблюдаемой энергией вылетающих частиц. Хотя периоды полураспада изменяются от миллионов лет до малых долей секунды, расчеты хорошо

согласуются с наблюдениями, что снова подтверждает одно из важных положений квантовой механики и в то же время указывает, что интерпретация альфа-распада находится на правильном пути.

Расщепление ядра

До сих пор роль физика можно было сравнить с ролью астронома, который может наблюдать и записывать поведение звезд и планет, но должен принимать их такими, каковы они есть, не будучи способным влиять на их судьбу. Резерфорд поставил перед собой цель искусственно разрушить ядро.

Он достиг успеха, тщательно наблюдая прохождение альфа-лучей через вещество, например через воздух. Мы видели уже, что большую часть времени они проходят через внешние части атомов, где они не отклоняются существенно от своего прямого пути. Случайно одна альфа-частица может подойти к ядру достаточно близко, чтобы сильно отклониться электрическими силами. В очень редких случаях одна из них испытывает прямое попадание в ядро. Это случается редко, так как мы стреляем вслепую по мишени с очень малым «яблочком». Ранее мы отмечали, что диаметр даже самого большого ядра почти в 10 000 раз меньше, чем диаметр атома, и поэтому площадь, которую ядро подставляет под поток частиц, меньше, чем площадь атома, в $(10\,000)^2$, т. е. в сто миллионов раз. Следовательно, проходя через атом, частица имеет лишь один шанс на сто миллионов испытать прямое соударение.

Правда, вдоль своего пути альфа-частица пройдет сквозь очень большое число атомов и в действительности у нее будет не одна попытка, а много. Но это не может продолжаться бесконечно, поскольку, проходя через внешние части атомов, альфа-частица проходит близко к электронам и возмущает их. Это приводит к своеобразному трению, и частица благодаря ему все время замедляется. После определенного числа таких прохождений она останавливается, но даже еще до остановки скорость ее становится недостаточной для преодоления отталкивательных сил, которые препятствуют ее приближению к

ядру. До остановки частица проходит, грубо говоря, 10 000 атомов, и это увеличивает ее шанс попасть в центр мишени. Шанс хотя бы один раз испытать прямое попадание — порядка от одного на сто тысяч до одного на миллион, в зависимости от начальной скорости и типа вещества, через которое она проходит. Если, например, она попадает в атом азота в воздухе, то в результате она прилипает к ядру и наружу выбрасывается протон (ядро водорода). Этот протон имеет гораздо большую скорость, чем первоначальная альфа-частица, поэтому до своей остановки пройдет дальше. Это объясняет, почему в присутствии большого количества альфа-частиц удалось обнаружить малое число протонов, которые проникают на расстояния, лежащие за пределами концов пробегов всех альфа-частиц.

В свое время работа Резерфорда производилась с помощью сцинтиллирующего экрана. Альфа-частицы радиоактивного вещества, попадающие на экран, покрытый специальной солью, вызывают ее свечение — явление, используемое в люминесцирующих рисунках и для светящихся стрелок часов. Если число альфа-частиц велико, получается непрерывное свечение, но если использовать очень слабый источник, свет становится нерегулярным и можно наблюдать слабую вспышку, или «сцинтилляцию», вызываемую отдельной альфа-частицей.

Если тонкую металлическую фольгу расположить между источником и экраном, можно добиться исчезновения сцинтилляций, поскольку все альфа-частицы тормозятся в фольге. В тяжелых металлах ни одна альфа-частица не может дать прямого попадания из-за больших отталкивательных сил со стороны ядра. Если теперь пространство, между источником и фольгой содержит воздух или чистый азот, то станет возможным снова увидеть небольшое число сцинтилляций. Они обязаны протонам, которые имеют больший пробег, чем исходные альфа-частицы, и не тормозятся полностью фольгой.

Резерфорд пришел к заключению, что каждый протон есть осколок ядра, с которым произошло соударение. При захвате альфа-частицы с ее двумя единицами положительного заряда заряд ядра увеличивается на два, но испускание протона уносит один заряд, так что в резуль-

тате заряд ядра увеличивается на единицу и благодаря этому ядро азота превращается в ядро кислорода.

В то время работа в этой области была медленной и трудоемкой благодаря двум ограничениям. Пригодные для бомбардировки источники радиации были ограничены, поскольку приходилось довольствоваться радиоактивным излучением, имеющимся в природе. Обнаружение результатов затруднялось использованием сцинтилляционного экрана, заставлявшего исследователя проводить долгие часы в полной темноте, наблюдая слабые вспышки света, едва различимые даже для терпеливого наблюдателя. Поэтому ядерная физика была революционизирована изобретениями, давшими нам гораздо более мощные пучки частиц и гораздо более удобные и чувствительные методы обнаружения.

Новое оборудование

Одним из наиболее эффективных методов обнаружения заряженных частиц является конденсационная камера, изобретенная Ч. Т. Р. Вильсоном. В ней водяной пар конденсируется в капли на ионах, которые образуются быстрыми заряженными частицами, выбивающими электроны из атомов. В результате получается след частицы, или «трек», очень похожий на туманный след, образуемый при подходящих условиях летящим высоко в небе самолетом. Рис. 63 дает диаграмму треков, соответствующую фотографии, полученной с такой камерой. Источник альфа-частиц находится внизу, и можно видеть прямые треки многих альфа-частиц. Одна из них, в частности, претерпела соударение с ядром азота, как это было описано выше. Виден более слабый след получающегося протона (более слабый, поскольку он движется с большей скоростью); толстый след соответствует ядру, отскакивающему после соударения. Картинки этого типа, на которых можно увидеть ядерные соударения, впервые были получены Блеккетом. Сходный метод, использующий фотографические пластинки, будет описан ниже.

В другом важном методе используется промежуток между пластинами электрического конденсатора с необходимой разностью потенциалов, так что электроны, вы-

биваемые из атомов прохождением заряженной частицы, притягиваются положительно заряженной пластиной. В этом случае через конденсатор проходит слабый импульс тока, который в дальнейшем усиливается электрон-

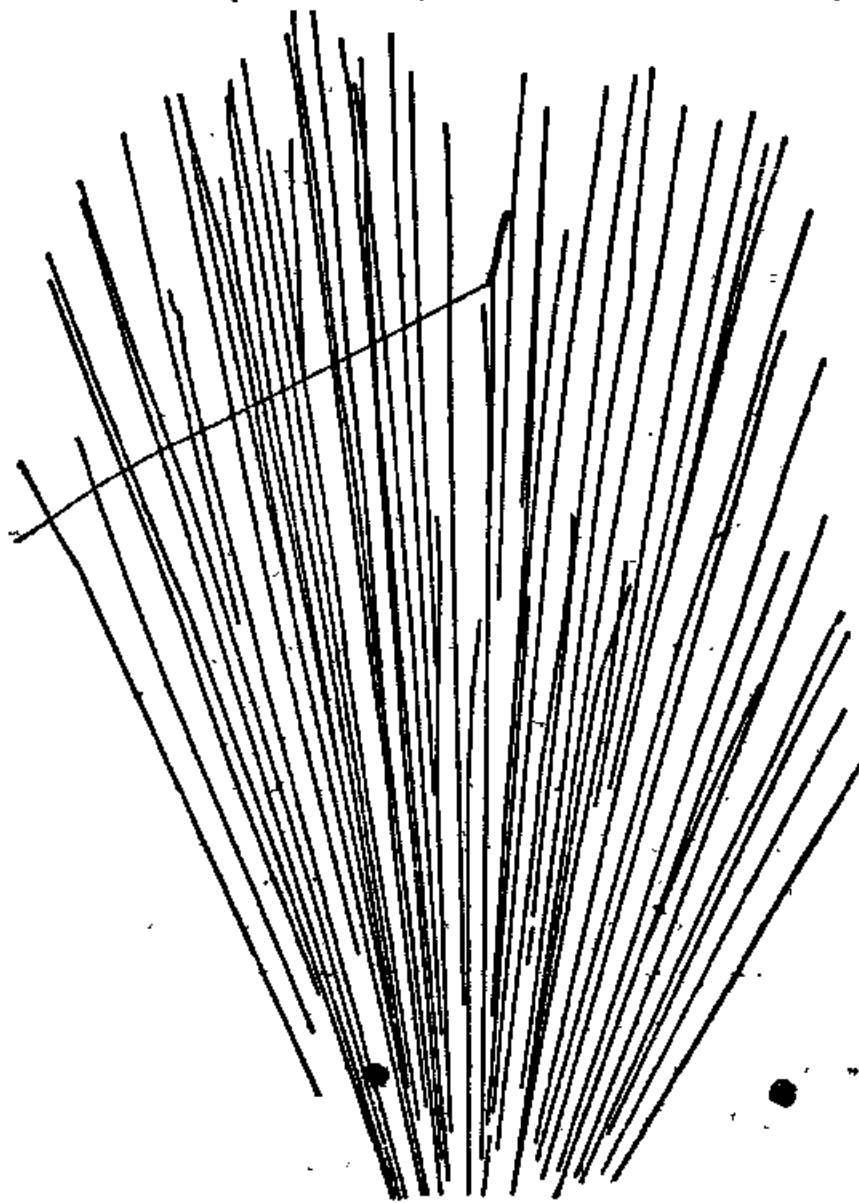


Рис. 63. Следы альфа-частиц в камере Вильсона.
Виден след протона, выбитого из ядра азота.

ным- устройством и может быть записан чисто механическим или иным путем. Эта установка известна под названием счетчика. Наиболее известными из приборов подобного типа являются счетчики Гейгера и трубки Гейгера — Мюллера, в которых потенциал, приложенный между проволокой и окружающей ее трубкой, почти достаточен для начала электрического разряда. Если

проходящая частица освобождает несколько электронов, то их может оказаться достаточно, чтобы начать разряд, причем устроено так, что разряд будет продолжаться лишь короткое время, спустя которое счетчик снова готов зарегистрировать следующую частицу.

Одна из новейших разрабатываемых установок основана на старой идее сцинтилляционного счетчика. Комбинируя сцинтиллирующий экран или, например, большой прозрачный кристалл вместе с модификацией фотоэлемента, можно вспышку света обнаружить электрически, так что больше нет нужды использовать глаз обученного наблюдателя; это делает счет проще, быстрее и надежнее.

Вместе с этими усовершенствованиями имел место большой прогресс в области искусственного получения пучков быстрых частиц. Впервые это было достигнуто Кокрофтом и Уолтоном, сконструировавшими электрическую установку, в которой полученная с помощью трансформаторов и выпрямителей разность потенциалов в несколько сот киловольт (т. е. несколько сот тысяч вольт) прилагалась к концам откачанной трубки. У положительного конца этой трубки протоны, или другие ядра, отрывались от своих электронов электрическим разрядом, ускорялись затем электрическим полем в трубке и вылетали из нее с энергией в несколько сот кэв. С этой аппаратурой Кокрофт и Уолтон могли разрушать ядра без помощи радиоактивных излучений.

Важной разновидностью этой установки является генератор Ван де Граафа, который имеет подобную ускоряющую трубку, но в котором используется иной метод для получения постоянного напряжения. Во многих ядерных лабораториях можно найти установки высокого напряжения типа Кокрофта — Уолтона или Ван де Граафа, способные давать частицы в несколько Мэв.

Было бы затруднительно достичь таким методом более высоких энергий, поскольку разность потенциалов в миллион вольт способна давать искру в воздухе на расстоянии в несколько футов и поэтому длина трубки, несущей подобную разность потенциалов, должна быть большой, чтобы избежать искрового разряда, который сделал бы невозможным получение больших напряже-

ний. Можно продвинуться несколько дальше, заключая всю аппаратуру в сосуд, заполненный воздухом или иным газом под высоким давлением, затрудняющим образование искры, но не представляется возможным получить этим методом больше нескольких Мэв.

Это ограничение преодолено в машинах, ускоряющих частицы без использования очень высоких разностей потенциалов. Из них проще всего описать линейный ускоритель. В принципе это ряд коротких металлических трубок, следующих одна за другой, как это показано на рис. 64. Переменное напряжение приложено к ним таким образом, что когда первая находится под положительным

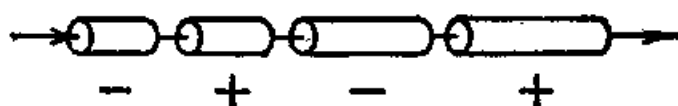


Рис. 64. Линейный ускоритель.

напряжением, то вторая — под отрицательным, третья — снова под положительным и так далее. Рассмотрим положительно заряженную частицу, например протон, проходящую из первой трубки во вторую, когда первая находится под положительным напряжением. Проходя промежуток между ними, частица оказывается в ускоряющем поле, и скорость ее будет возрастать. Длина трубки выбрана таким образом, что напряжение изменится на обратное ко времени, когда частица достигнет конца второй трубки, так что вторая трубка станет положительной, а третья — отрицательной. Благодаря этому частица снова ускорится. Если частица пройдет таким образом десять промежутков, приобретенная ею энергия будет в десять раз больше, чем та, которую она получает в одиночном промежутке, и поэтому частица получит такую энергию, как если бы она прошла разность потенциалов, в десять раз большую, чем та, которая имеется между двумя трубками. В принципе эта установка может быть продолжена как угодно далеко, но подвод электрической мощности для большого числа ускоряющих промежутков затруднителен.

Эта трудность преодолена в циклотроне, изобретенном Е. О. Лоуренсом. В нем переменное напряжение прикла-

дывается между двумя открытыми металлическими коробками, расположенными одна против другой своими открытыми сторонами. Путь заряженных частиц заворачивается по кругу наложением магнитного поля. Ранее мы уже видели, что в магнитном поле заряженная частица отклоняется от прямого пути и описывает окружность. Радиус окружности увеличивается вместе с ростом скорости частицы, но, пока не играют роли поправки на теорию относительности, время обращения одно и то же как для медленной частицы, которая обращается по малой окружности, так и для быстрой частицы на окружности большого радиуса. Частота переменного поля подобрана таким образом, что его полный цикл соответствует полному обороту частицы. Таким путем можно добиться, чтобы частицы переходили из одной коробки в другую в тот момент, когда первая имеет положительный потенциал, а вторая — отрицательный, и возвращались обратно, когда разность потенциалов изменяет знак. Таким образом они ускоряются дважды за каждый оборот. Этой установкой возможно доводить частицы до энергий, соответствующих многим миллионам электрон-вольт, в то время как переменная разность потенциалов между коробками составляет лишь доли миллиона вольт. Для обычных работ по ядерной физике циклотрон производит частицы с энергиями от нескольких $Mэв$ до 20 или 30 $Mэв$.

В последние годы интерес переместился в область еще больших энергий. Теперь существуют циклотроны, способные ускорять протоны до энергий 400—500 $Mэв$. Это составляет около половины энергии покоя протона, и поэтому поправками на теорию относительности нельзя пренебрегать. Нельзя более считать, что период обращения такой частицы один и тот же для любой энергии: период начинает существенно возрастать с ростом энергии, и в подобных машинах высокой энергии следует использовать несколько более сложную схему. Вместо того чтобы держать неизменной частоту переменного тока, делают так, что частота уменьшается по мере ускорения группы частиц, чтобы оставаться в соответствии с их движением. Эта машина будет ускорять лишь те частицы, которые начинают свое движение в определенное время,

таким образом она дает не непрерывный пучок, а сгустки частиц. Когда одна группа частиц ускорена до максимальной энергии, частота возвращается к прежнему значению и машина готова для ускорения следующего сгустка частиц.

В этом принципе нет ограничений для возможной достижимой энергии, кроме того, что частица очень высокой энергии движется по кругу очень большого радиуса, требуя для этого протяженного магнитного поля, т. е. большого магнита. Подобные машины становятся поэтому дорогостоящими изделиями тяжелой индустрии. Чтобы уменьшить величину магнита, можно заставить частицы двигаться по фиксированной окружности, а не пускать их с очень маленького радиуса, который в дальнейшем будет постепенно расти. Этого можно достичь, меняя со временем и магнитное поле так, чтобы каждый сгусток частиц ускорялся, начиная свой путь в очень слабом поле, которое возрастает по мере того, как ускоряются частицы. В этом случае необходимо создать магнитное поле лишь в кольцеобразном районе, где частицы остаются от начала до конца. Подобное устройство, в котором как магнитное поле, так и частота изменяются в соответствии с ускорением каждого сгустка частиц, называется синхротроном. Ко времени написания этой книги подобным методом были достигнуты энергии частиц в несколько тысяч $Mэв$ и обсуждались планы создания новых машин на энергии до 20 000—30 000 $Mэв$. Однако подобные установки не относятся, в сущности, к настоящей главе, поскольку они главным образом используются для исследования проблем, которые будут изучаться в следующей главе.

Нейтроны, изотопы, дефект массы

После этого беглого обзора оборудования и методов физика-ядерщика вернемся к результатам его работы.

Очень важным шагом в понимании структуры ядра явилось открытие Чадвиком нейтрона (1932 г.). Это — частица приблизительно такой же массы, как и протон (в действительности немного тяжелее), но отличающаяся от протона тем, что не несет электрического заряда. Как

показывает название, она электрически нейтральна. Нейтроны обычно получаются таким же путем, как и протоны в раннем опыте Резерфорда, а именно при соударении какой-либо заряженной частицы с ядром.

Когда такие нейтроны проходят через вещество, они не испытывают взаимодействия с электронами и поэтому могут проходить прямо сквозь атомы, не возмущая их во все и не теряя скорости на пути. Поэтому они летят, пока не испытают прямого соударения с каким-либо атомным ядром, и могут быть обнаружены только по результатам таких соударений. Это делает нейтроны очень удобными снарядами при бомбардировке ядер, если требуется изучить поведение последних. В то время как заряженная частица, например протон или альфа-частица, обычно затормаживается трением до того, как ей представится случай испытать прямое соударение с ядром, нейтрон всегда летит беспрепятственно до тех пор, пока не будет иметь место именно такое соударение. Однако, поскольку не существует способов ускорять нейтроны до высоких энергий, основные доступные физикам источники нейтронов (кроме ядерных реакторов, к которым мы вернемся позднее) связаны с бомбардировкой ядер быстрыми заряженными частицами. Мы получаем интересующее нас соударение почти для каждого нейтрона, но для получения одного нейтрона нужно ускорить значительное количество заряженных частиц, большая часть которых пропадает.

Тот факт, что нейтроны и протоны могут быть выбиты из ядра в результате столкновений, указывает на то, что они содержатся в каждом ядре, и мы действительно знаем, что ядра состоят исключительно из нейтронов и протонов.

Это немедленно объясняет давно замеченный факт, состоящий в том, что атомный вес многих элементов почти точно составляет целое кратное атомного веса водорода. Например, масса альфа-частицы, или ядра гелия, очень близка к четырехкратной массе протона. То, что электрический заряд ее равен удвоенному заряду протона, указывает, что она состоит из двух протонов и двух нейтронов. Аналогично, ядро кислорода, имеющее 8 единиц заряда и 16 единиц массы, состоит из 8 протонов и 8 нейтронов.

Прежде чем принять это объяснение, следует понять, почему атомный вес некоторых элементов не подчиняется этому правилу. Типичным исключением является случай хлора, имеющего атомный вес около 35,5. Объяснение этому давно дал Содди, предположивший, что подобные элементы в действительности представляют собой смеси различных сортов атомов разного веса, которые химически неразличимы. Другими словами, не все атомы хлора одинаковы. Некоторые имеют ядра с массой в 35 единиц, а некоторые — с массой в 37 единиц. И те, и другие имеют одинаковый заряд, равный 17 зарядам протона, и поэтому оба сорта содержат 17 электронов, что определяет их химическое поведение. Такие атомы, одинаковой химической природы, но разной массы, известны как «изотопы» — слово греческого происхождения, указывающее, что они занимают одно место в системе элементов.

Эта гипотеза была подтверждена посредством масс-спектрографа, изобретенного Астоном. Это — прибор, в котором пучки ионов отклоняются в электрическом и магнитном полях. По величине отклонения можно судить о величине отношения заряда к массе, как мы видели в главе 4. Если в масс-спектрографе анализируется, например, такой элемент, как хлор, то на приемной пластинке видны две отдельные линии. Одна представляет след атомов с массой 35, а другая — атомов с массой 37, которые, будучи немного тяжелее, не так сильно отклоняются от прямого пути. Подобные исследования показали, что большинство элементов является в действительности смесью изотопов, но во многих случаях одного из изотопов гораздо больше, чем других, так что средний атомный вес, измеряемый химическим путем, очень близок к весу одного преобладающего изотопа.

Поскольку мы знаем, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов, можно заключить, что различные изотопы одного и того же элемента должны содержать одно и то же число протонов (чтобы иметь одинаковый электрический заряд), но различные числа нейтронов. Например, упомянутые два изотопа хлора содержат по 17 протонов и соответственно 18 и 20 нейтронов каждый. Было найдено, что даже простейший элемент, водород, в естественном состоянии имеет изотоп. Это так называемый

тяжелый водород с атомным весом 2; его ядро состоит, очевидно, из одного протона и одного нейтрона. Он очень редок, составляя в естественном водороде одну пятитысячную часть. Существует даже небольшое различие в химическом поведении между обычным и тяжелым водородом, и по этой причине тяжелому водороду было дано специальное химическое название «дейтерий», а его ядро называют дейтроном. Мы не будем вдаваться в причины небольшой разницы в химическом поведении, которая связана с квантовыми эффектами при колебании атома водорода или дейтерия в молекуле.

Теперь мы можем ожидать, что масса отдельного ядра или атомный вес чистого изотопа будет равняться в точности сумме всех содержащихся в нем нейтронов и протонов. Но это не совсем так. Атомный вес каждого ядра несколько меньше, чем суммарный вес его составных частей. Это подтверждается как точными наблюдениями с масс-спектрографом, так и сравнением измеренных химическим путем атомных весов в тех случаях, когда существен только один из изотопов каждого элемента. Например, атомный вес кислорода, который должен быть больше шестнадцатикратного атомного веса водорода (поскольку нейтрон слегка тяжелее протона), в действительности меньше этого числа приблизительно на 1%.

Этот «дефект массы» объясняется эквивалентностью массы и энергии, следующей из законов теории относительности (см. гл. 6). При образовании ядра кислорода из восьми протонов и восьми нейтронов должна освободиться энергия; и наоборот, чтобы разбить ядро кислорода на части, энергию надо сообщать. Иными словами, ядро содержит меньше энергии, чем восемь протонов и восемь нейтронов, отделенные друг от друга, а поскольку масса и энергия эквивалентны, недостаток энергии означает недостаток массы. Теперь мы знаем из опытов по ядерным столкновениям, какое количество энергии требуется, чтобы выбить частицу из ядра, и сколько освобождается энергии при захвате, например, дейтрона атомом азота с образованием ядра кислорода.

Аналогично мы можем определить, сколько энергии освобождается при образовании азота из более легких ядер, и таким образом мы можем найти, что полная

«энергия связи» ядра кислорода — около 120 Мэв . Поделив ее на квадрат скорости света, согласно соотношению Эйнштейна найдем уменьшение массы. Поскольку 1 Мэв есть энергетический эквивалент двух масс электронов, мы видим, что «дефект массы» равен приблизительно 250 электронным массам или несколько больше 1% массы атома кислорода. Сравнение дефектов массы и энергий связи дает превосходное совпадение во всех случаях, что опять подтверждает как наши представления о строении ядра, так и принципы теории относительности.

Ядерные силы

Следующей возникающей перед нами фундаментальной проблемой является вопрос о природе сил, которые удерживают в ядре вместе нейтроны и протоны. Очевидно, они не могут быть электрическими силами, поскольку все протоны имеют одинаковые заряды и будут скорее отталкиваться друг от друга, чем притягиваться, нейтроны же вовсе не несут электрического заряда.

Ясно также, что эти силы должны быть гораздо значительнее электрических. Это можно увидеть из того факта, что ядро приблизительно в 100 000 раз меньше в диаметре, чем атом. Энергия взаимодействия двух зарядов изменяется обратно пропорционально расстоянию между ними, и можно ожидать поэтому, что энергия электрического взаимодействия в ядре будет больше, чем в атоме, в 100 000 раз. В атоме она порядка нескольких электрон-вольт, и можно ожидать, что для любой пары частиц в ядре она окажется порядка одного миллиона электрон-вольт или несколько меньше. Но энергия притяжения, которая удерживает любую частицу в ядре, имеет, вообще говоря, порядок от 6 до 8 миллионов электрон-вольт. Оба этих аргумента показывают, что внутри ядра должны действовать силы иной природы и что действуют они как на протоны, так и на нейтроны. Мы называем их «ядерными силами», и получение точных законов ядерных сил является центральной проблемой ядерной физики, которая не решена полностью до сих пор.

В этом смысле развитие ядерной физики сильно отличается от истории развития учения об атоме. Как только

было установлено, что атом содержит электрически заряженные частицы, не осталось сомнений, что основные действующие между ними силы обязаны электростатическому взаимодействию и подчиняются закону Кулона. В этом случае, как мы видели в главах 7 и 8, трудность состояла в том, что нужно было пересмотреть основные законы механики, прежде чем применить их к атому. С другой стороны, все данные указывают, что общие законы квантовой механики, так хорошо подтвердившиеся в области атома, все еще приложимы для еще меньших масштабов, соответствующих ядру. Но у нас нет точных сведений о действующих силах и нам приходится получать всю информацию о них, изучая поведение ядер, например при их соударениях.

Таким образом были установлены самые общие черты этих сил. В первую очередь было замечено, что для того, чтобы объяснить наблюдающиеся значения энергий связи, силы должны быть очень велики, гораздо больше, чем электрические силы между двумя частицами на соответствующих расстояниях. Известно также, что силы должны иметь очень короткий радиус действия, т. е. они убывают с ростом расстояния гораздо быстрее, чем электростатические силы. Это следовало уже из ранних наблюдений Резерфорда, установивших, что отклонения проходящих через вещество альфа-частиц могут быть объяснены кулоновскими силами, обусловленными электрическим зарядом ядра. Действительно, более подробные эксперименты показывают, что закон Кулона применим, даже когда альфа-частица приближается почти вплотную к ядру. Другими словами, если ядро и альфа-частица разделены даже очень малым расстоянием, ядерные силы пренебрежимо малы в сравнении с электрическими. Этот же вывод следует из того факта, что потенциальный барьер, изображенный на рис. 62, очень точно предсказывает наблюдаемое время жизни по отношению к испусканию альфа-частицы, если точка *B* выбрана лежащей на расстоянии от центра, равном сумме радиусов альфа-частицы и ядра.

Количественно более точная оценка радиуса действия сил, т. е. расстояния, на котором они способны действовать, получается при наблюдении рассеяния нейтронов

протонами. В простейшей (для сравнения с теорией) форме подобного эксперимента пучок нейтронов проходит через газообразный водород, после чего наблюдают, сколько нейтронов отклонится от своего прямого пути и на какой угол. Если бы мы имели дело с «дальнодействующими» силами типа кулоновских, то можно было бы ожидать, что нейтроны, проходящие на далеком расстоянии от протона, будут отклонены лишь немного, а те, которые пройдут ближе, испытают большие отклонения. Поэтому можно ожидать, что многие частицы отклонятся лишь слегка, а небольшое их число — на большие углы, как в эксперименте Резерфорда по рассеянию альфа-лучей.

В действительности мы наблюдаем, что очень малое число нейтронов сталкивается с ядром водорода, но все они рассеиваются как на малые, так и на большие углы. Это в точности та картина, которую следует ожидать при рассеянии волн на очень маленькой локализованной неоднородности среды, с размерами, меньшими длины волны. Мы можем заключить, что действие ядерных сил ограничено расстояниями, меньшими, чем длина волны нейтронов, используемых в этих экспериментах, вплоть до энергий в несколько Mev . Зная долю нейтронов, рассеянных при прохождении через заданное количество водорода, и ход ее изменения с энергией нейтронов, можно вывести, что силы простираются лишь на расстояние около $2 \cdot 10^{-13}$ см, которое мало даже в ядерной шкале.

Таким же образом мы можем изучать прохождение протонов через газообразный водород. Конечно, здесь мы будем иметь много случаев отклонения на малые углы благодаря электрическому отталкиванию между движущимся протоном и протонами газообразного водорода, но при высоких энергиях и для больших углов можно наблюдать дополнительное рассеяние, обязанное ядерным силам. Интересным результатом этого эксперимента является то, что ядерные силы между двумя протонами оказываются в точности такими же, как и между нейтроном и протоном.

Поскольку нейтрон и протон могут благодаря взаимодействию удерживаться вместе и образовывать дейтрон, можно на первый взгляд предположить, что аналогичная проблема взаимодействия между двумя протонами приве-

дет также к связанному состоянию, в котором два протона удерживаются вместе. Они образовали бы тогда ядро с массой 2 и зарядом 2, другими словами — изотоп гелия с атомным весом 2. В действительности это не так.

Причину следует искать в принципе исключения Паули, который обсуждался в главе 8 для электронов и который справедлив также для протонов или нейтронов. Согласно этому принципу два протона не могут одновременно быть в одном состоянии движения, если их спины также параллельны. С другой стороны, нейтрон и протон являются различными частицами, поэтому принцип запрета не связывает состояние одной с состоянием другой. Оказывается, что в единственном связанном состоянии дейтрона обе частицы движутся одинаковым образом и обладают параллельными спинами; для двух тождественных частиц, например двух протонов, подобное состояние нарушало бы принцип Паули.

Есть все основания полагать, что ядерные силы между двумя нейтронами будут такими же, как и между двумя протонами, или между нейтроном и протоном. Это не может быть непосредственно проверено, поскольку на практике невозможно наблюдать столкновение между двумя нейтронами (мы никогда не располагаем на практике достаточно большим числом нейтронов, чтобы использовать их как мишени, которые можно обстреливать другими нейтронами, рассчитывая на прямое попадание). Однако мы знаем, что силы взаимодействия между нейтроном и нейтроном и между протоном и протоном должны быть очень схожи, потому что каждое ядро проявляет свойства, очень схожие со свойствами ядра, которое получается заменой всех нейтронов протонами, и наоборот.

Например, изотоп водорода с массой 3, состоящий из протона и двух нейтронов (который очень редок в природе, но может быть получен в лаборатории), своей энергией связи и поведением при столкновениях очень похож на изотоп гелия той же массы, состоящий из двух протонов и одного нейтрона. Последний связан несколько слабее, но разница как раз такова, какую можно ожидать от взаимного отталкивания двух протонов. Эти и подобные сравнения указывают, что ядерные силы между нейтронами и протонами полностью симметричны.

Таким образом, мы находим, что сила между двумя нейтронами, двумя протонами и нейтроном и протоном одинакова, и это правило, называемое зарядовой независимостью ядерных сил, приводит к ценному упрощению проблемы. Дальнейшие детали взаимодействия обнаруживаются экспериментами с большими энергиями, порядка нескольких сотен $Mэв$; такие эксперименты стали возможными благодаря машинам высоких энергий, о которых я уже говорил. При таких энергиях длина волны сталкивающихся частиц становится меньше, чем радиус действия ядерных сил, и возникает более сложная дифракционная картина.

Одно замечание особенно интересно. При энергиях в несколько сотен $Mэв$ кинетическая энергия частиц, несомненно, много больше, чем их взаимная потенциальная энергия на малых расстояниях, которая порядка 30—50 $Mэв$, и мы должны ожидать поэтому, что налетающие частицы будут лишь слегка отклоняться. Другими словами, при бомбардировке водорода нейтронами таких больших энергий можно ожидать, что большинство рассеянных нейтронов полетит вперед, отклонившись лишь на малые углы.

Эксперименты действительно показывают, что многие отклоненные нейтроны движутся почти точно вперед, но такое же число их отклоняется на большие углы, причем протоны выбрасываются почти точно вперед. Это можно понять, только если силы частично являются «обменными». Под этим мы понимаем силы, вызывающие обмен частиц, так что частица, идущая вперед, в действительности превратилась в протон и несет электрический заряд, в то время как частица, в которую было попадание, испытала небольшую отдачу и превратилась в нейтрон. Существование подобных обменных сил в действительности было предсказано из формы кривой энергий связи тяжелых ядер задолго до того, как стали возможны эксперименты с частицами высоких энергий. Обзор рассуждений, приведших к этому, увел бы нас слишком далеко.

Имеется много данных, которые указывают на очень сложную природу ядерных сил. Например, известно, что ядерные силы между двумя частицами зависят от того, параллельны их спины или нет (уже было упомянуто, что

нейтрон и протон притягивают друг друга с силой, достаточной для образования связанного состояния, только в случае, если их спины параллельны). Когда спины параллельны, силы между частицами не только притягивают их друг к другу, подобно электрическим силам между двумя зарядами, но и стремятся расположить их так, чтобы соединяющая их линия стала параллельной направлению спинов. Есть также указания, что силы зависят от того, как расположен относительно направления спинов момент количества движения, с которым частицы вращаются одна вокруг другой.

Модель оболочек. Возбужденные состояния

Если бы даже мы точно знали законы ядерных сил, то еще осталась бы проблема: как описать движение нейтронов и протонов в любых ядрах, кроме быть может, самых простых. Трудность эта сходна с аналогичной, возникающей в случае атомов. Там мы нашли возможным классифицировать различные состояния атомов, считая электроны движущимися независимо друг от друга. Предполагалось, что каждый электрон движется в потенциальном поле, которое складывается из притяжения ядра и усредненного отталкивания от всех прочих электронов. Таким же образом мы можем подойти к проблеме ядра, считая каждый нейтрон и протон движущимися независимо друг от друга в некотором потенциальном поле, в среднем представляющем притяжение, обязанное всем остальным частицам, вместе взятым.

Снова, как и в случае атома, низшее состояние соответствует отсутствию вращения, и согласно принципу Паули мы можем разместить там два нейтрона (с противоположными спинами) и два протона. Если к ним прибавляется еще одна частица, она должна занять следующий уровень и не будет связана так сильно. С этой точки зрения ядро, состоящее из двух нейтронов и двух протонов, которое как раз и есть альфа-частица, образует особенно стабильную группу, так что требуется особенно высокая энергия, чтобы удалить из нее частицу, и выигрывается гораздо меньше энергии при добавлении к ней еще одной частицы. Это соответствует опыту и указывает на причину,

почему альфа-частицы оказываются обычно продуктами распада радия и других радиоактивных ядер.

Можно рассматривать таким образом тяжелые ядра, и это приводит к ядерной «модели оболочек», которая очень помогает пониманию многих закономерностей в таблице ядер. Однако она остается достаточно грубой моделью, гораздо более грубой, чем в случае атома, и это не удивительно. Благодаря короткому радиусу действия ядерных сил нейтрон, движущийся в ядре, подвергается воздействию преимущественно со стороны ближайших соседей, а не всех частиц в ядре; поэтому поведение соседей сказывается на нем в гораздо большей степени, чем в случае атомного электрона. Это влияние не учтено в модели оболочек, поскольку она предполагает частицы движущимися независимо друг от друга.

До сих пор мы говорили главным образом о ядрах в их нормальном состоянии. Но как и атом, ядро может находиться в возбужденном состоянии с более высокой энергией. Как и атом, оно, вообще говоря, освобождается от этой энергии, испуская один или несколько фотонов, и возвращается в нормальное состояние. Следовательно, если ядра сильно возмущены, мы можем ожидать излучения фотонов высокой энергии, т. е. гамма-лучей. Ядра возбуждаются радиоактивным распадом, например испусканием альфа-частицы, в результате возникают гамма-лучи, которые были обнаружены в некоторых случаях как сопутствующие радиоактивному распаду. Они могут быть также возбуждены внешней бомбардировкой, и это дает нам возможность изучать почти для всех ядер испускание гамма-лучей и, следовательно, энергии их возбужденных состояний.

Другие данные об этих возбужденных состояниях мы получаем из изучения потерь энергии частицами при ядерных соударениях (энергия, потерянная частицей, идет на возбуждение ядра) и из баланса энергии реакции, после которой одно или несколько ядер оказываются в возбужденных состояниях.

Изучение уровней ядерной энергии, или ядерная спектроскопия, дает колоссальное количество сведений, которые могут быть использованы, чтобы дальше осветить детали проблемы ядерных сил и ядерных движений.

Бета-лучи

Мы не упоминали еще о бета-лучах, которые также были известны со времени самых ранних работ по радиоактивности. Под этим названием понимаются лучи, испускаемые некоторыми ядрами; эти лучи, как показал Резерфорд, состоят из быстрых электронов. Откуда они берутся?

Можно подумать, что они также являются составной частью ядра, но это будет противоречить заключению о том, что ядро состоит только из протонов и нейтронов, которое было так убедительно подтверждено многими способами. Кроме того, трудно поверить, чтобы электроны можно было уместить в столь малом объеме, как атомное ядро, поскольку согласно принципу неопределенности они имели бы кинетическую энергию во много сотен Мэв, и если бы существовали силы притяжения, достаточные, чтобы несмотря на это удерживать электроны, то они проявили бы себя во многих экспериментах.

Поэтому следует заключить, что электроны рождаются при бета-распаде, и отрицательный их заряд компенсируется превращением нейтрона в протон. Однако это не все. Бета-распад обычно происходит в ядре, которое не испытывало возмущений в течение продолжительного времени и должно поэтому считаться находящимся на наинизшем уровне энергии. Его бета-распад может иметь место, только если конечное ядро, имеющее на один протон больше и на один нейтрон меньше, чем исходное, будет обладать меньшей энергией. Это ядро также будет находиться в точно определенном состоянии, и разность E между этими двумя состояниями определяет состояние электрона. Пусть энергия покоя составляет mc^2 ; тогда остаток $E - mc^2$ должен явиться кинетической энергией электрона. Другими словами, все электроны, получающиеся при бета-распаде данного ядра, должны иметь одну и ту же энергию.

Но этого не наблюдалось. Если мы измерим энергии электронов, выходящих из данного радиоактивного вещества, они, против ожидания, заполнят все значения от нуля до некоторого максимума, который, если разность энергий E может быть определена непосредственно из

других реакций, отвечает ожидаемой энергии $E - mc^2$. Поэтому кажется, что в каждом процессе бета-распада исчезает переменное количество энергии.

Аналогичное противоречие возникает, если рассмотреть полный угловой момент, который не должен меняться при таком процессе. Предположим для простоты рассуждений, что ядро содержит четное число нейтронов и протонов вместе. Каждый из них, как мы знаем, имеет спин $1/2$. Четное число таких частиц дает целочисленную добавку к угловому моменту. Их движение друг относительно друга также дает целое число единиц, как мы это видели в главе 8, и поэтому до бета-распада мы имеем целочисленный момент. То же самое имеет место для ядра, получающегося после бета-распада. Но, кроме того, мы получили электрон, который сам по себе имеет полуполный спин. Другими словами, половина единицы выпадает из баланса и это не может быть компенсировано никаким движением частиц, которое всегда дает целочисленный вклад.

Перед лицом этих противоречий Паули предположил, что вместе с электроном образуется новая частица, которая ускользает от обнаружения. Она должна быть нейтральной (если бы она несла заряд, то ее легко можно было бы обнаружить любым обычным детектором); ее спин должен быть полуполным. Это предположение немедленно восстанавливает баланс моментов количества движения и можно ожидать, что в процессе с образованием двух частиц выделяющаяся энергия будет по-разному разделена между ними от случая к случаю. Эту новую и очень загадочную частицу называли «нейтрино».

Детальное рассмотрение распределения энергии между электроном и нейтрино показало, что масса его должна быть гораздо меньшей, чем масса электрона. Вероятно, она равна нулю, как и у светового кванта. Необходимость придумывать новую частицу, которая никогда не наблюдалась непосредственно, а нужна была лишь для спасения нашей теории, вызвала естественное чувство неудовлетворенности. Но эта частица стала несколько более реальной, когда тщательные эксперименты по изучению отдачи ядер при бета-распаде показали, что импульс ядра не уравнивает в точности импульса образу-

щегося электрона и что эта разница снова согласуется с гипотезой о том, что выбрасывается некоторая частица с импульсом, как раз соответствующим частице, летящей с недостающей энергией.

Тем не менее мы не можем быть абсолютно уверенными в существовании нейтрино, пока нам не удастся наблюдать процесс, вызванный этой частицей. Очевидно, что в принципе это возможно. Если нейтрино может испускаться при ядерном процессе, обратное также возможно, т. е. нейтрино, сталкиваясь с ядром, поглощается им вместе с каким-нибудь соседним электроном или образуя новый электрон. Но известно также, что подобные процессы должны быть необычайно редкими, поскольку сам бета-распад есть процесс чрезвычайно медленный. Среднее время жизни бета-радиоактивного ядра может равняться часам, неделям или того больше, в зависимости от имеющейся энергии, но это необычайно большое время в сравнении с тем, например, которое необходимо нейтрино, чтобы пройти сквозь ядро, и которое имеет порядок 10^{-23} секунды. Соответственно этому в обратном процессе нейтрино должно пройти вблизи очень многих ядер, пока не представится реальный шанс вызвать обратный бета-процесс. Было подсчитано, например, что нейтрино должно много раз пройти сквозь земной шар по его диаметру, чтобы испытать одно соударение.

Несмотря на эти громадные трудности, в настоящее время получено указание на существование обратного бета-процесса. Конечно, потребуется некоторое время, прежде чем это открытие будет доказано с несомненностью.

Бета-распад свойствен не только естественным радиоактивным элементам, но имеет место, если мы получаем бомбардировкой или иным путем ядро, имеющее слишком большое по сравнению с числом протонов число нейтронов, так что превращением нейтрона в протон энергия может быть уменьшена больше чем на mc^2 . Даже отдельный нейтрон радиоактивен, поскольку, как это уже упоминалось, он несколько тяжелее, чем протон плюс электрон. Он распадается на протон, электрон и нейтрино со средним временем жизни около 20 минут.

Наоборот, если ядро содержит много протонов, протон может превратиться в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино. Этот процесс был открыт Жолио-Кюри и был первым примером искусственной радиоактивности, т. е. изготовления искусственной бомбардировкой нового нестабильного ядра, испускающего бета-лучи.

Существование как позитронного, так и электронного бета-распада объясняет, почему каждый элемент в природе имеет лишь небольшое число стабильных изотопов. Представим себе, что нейтроны и протоны в ядре заполняют отдельные энергетические уровни или оболочки, и пусть в ядре слишком много нейтронов; тогда согласно принципу Паули нейтроны оказываются на слишком высоких возбужденных уровнях, т. е. в далеких оболочках, в то время как протоны, которых меньше, заполняют лишь низшие уровни. В этом случае мы, очевидно, можем выиграть энергию, превращая нейтрон в протон, поскольку это позволит нам перевести его из самой высокой занятой нейтронной оболочки на нижний уровень не полностью заполненной протонной оболочки. Другими словами, можно высвободить энергию, превращая нейтрон в протон, что означает возможность бета-распада.

Наоборот, если протонов больше, чем нейтронов, мы можем освободить энергию, превращая протон в нейтрон позитронным бета-распадом.

В действительности, если принимать эти доводы буквально, то можно ожидать, что ядра будут стабильны, только если они содержат приблизительно одинаковые количества нейтронов и протонов. Для легких элементов это действительно так. Например, обычный изотоп кислорода содержит, как мы видели, 8 нейтронов и 8 протонов. Но для тяжелых ядер число нейтронов вообще превышает число протонов. В наиболее устойчивом изотопе свинца, например, содержится 82 протона и 126 нейтронов. Причина этого заключается в электрическом отталкивании протонов, которое сообщает ядру большую электрическую потенциальную энергию, растущую с числом протонов. Это сдвигает равновесие в направлении уменьшения числа протонов.

Действительное отношение числа нейтронов к числу протонов является компромиссом между тенденцией к

выравниванию чисел, чтобы собрать как можно больше частиц в самых внутренних оболочках, и тенденцией к уменьшению числа протонов, чтобы снизить электростатическую энергию. Действительное распределение стабильных ядер может быть удовлетворительно объяснено этими соображениями.

Деление. Источники энергии

Как мы только что видели, самые тяжелые ядра имеют значительную электростатическую энергию, обязанную электростатическому заряду содержащихся в них протонов, и поэтому мы можем также выиграть энергию, разбив подобное ядро на два, уменьшив этим заряд каждой части. Каждая из полученных таким образом частей будет бета-активной и благодаря этому будет увеличивать свой заряд и несколько выравнивать числа протонов и нейтронов. Для большинства ядер это лишь гипотетический эксперимент, поскольку расщепление такого ядра на два является операцией, которая не может быть проведена без предварительного внесения значительного количества энергии, хотя в конце мы получим энергии гораздо больше, чем пришлось внести. Рис. 65 иллюстрирует простейший путь проведения подобной операции.

Нормально форма ядра близка к сферической, как это изображено на рис. 65, а. Если мы немного растянем его



Рис. 65. Деление.

так, чтобы придать ему овальную форму, как на рис. 65, б, нам придется совершить работу против притяжения друг к другу нейтронов и протонов, которое стремится придать ядру наиболее компактную форму — сферическую. Сначала мы выигрываем лишь немного энергии за счет увеличения расстояния между электрическими зарядами. Но если мы пойдем дальше, то последующий рост расстояния

перевесит эффект потери компактности, и после того как мы достигнем формы, напоминающей изображенную на рис. 65, в, отталкивание между концами придаст ядру форму, похожую на 65, г, и, наконец, обе части разделятся. Они разлетятся в противоположные стороны под действием значительной силы, обязанной электрическому отталкиванию осколков.

Этот процесс известен как «деление ядра». При достаточно большом заряде, большем, например, чем 120 зарядов протона, весь процесс, начавшись с *a*, будет идти все время с уменьшением энергии; другими словами, он начнется самопроизвольно, без всякого внешнего возмущения. Такое ядро никогда не сможет просуществовать время, достаточное для его наблюдения.

Даже для меньших зарядов есть вероятность для самопроизвольного деления. Это обязано явлению прохождения через потенциальный барьер, которое мы обсуждали в конце главы 8. Согласно квантовой механике ядро может пройти через состояние более высокой энергии, «завняв» необходимую для этого энергию на очень короткое время, и поэтому имеется некоторая вероятность пройти через состояния от *a* до *г* и испытать деление. Этот процесс спонтанного деления наблюдаем даже на уране, самом тяжелом из имеющихся в природе элементов. Процесс этот очень редко встречается, гораздо реже, чем весьма медленный альфа-распад, так что многие ядра урана испустят альфа-частицы прежде, чем произойдет одно деление. Спонтанное деление является одной из причин, по которой самые тяжелые элементы не могут существовать в природе.

Процессу деления способствует бомбардировка нейтронами. Даже если в ядро урана попадает медленный нейтрон, он притягивается другими частицами и поэтому входит в ядро с заметной кинетической энергией. Она будет разделена между всеми другими частицами и вызовет интенсивное и нерегулярное движение всего ядра. Вследствие этого движения ядро легко может быть деформировано до формы, похожей на 65, б или в, и в результате произойдет деление.

Однако эти колебания в ядре будут длиться лишь непродолжительное время, поскольку любая колеблющаяся

система, содержащая заряженные частицы, подобно атому испускает электромагнитное излучение и теряет таким образом энергию. Вопрос поэтому в том, есть ли у ядра шанс испытать деление, пока продолжаются эти колебания. Это зависит как от размаха колебаний (что в свою очередь зависит от того, как сильно притягивается избыточный нейтрон), так и от того, как велика склонность ядра к делению. В этом смысле более легкий изотоп урана с массой в 235 единиц удобнее для деления, чем более распространенный изотоп с массой 238. Первый при одном и том же заряде имеет меньший размер, и поэтому его тенденция к делению сильнее. В то же время притяжение им внешнего нейтрона больше и поэтому, захватив нейтрон, он приходит в более интенсивные колебания. В результате, если ядро урана 235 захватит медленный нейтрон, то оно почти всегда испытает деление. В случае ядра урана 238 это вряд ли вообще случится. Уран 238 может быть расщеплен, если использовать быстрые нейтроны, усиливающие интенсивность колебаний. В некоторых других элементах деление может быть вызвано достаточно быстрыми нейтронами.

После того как оба осколка разлетелись, как это изображено на рис. 65, *д*, они в результате действия растолкнувшей их силы будут находиться в состоянии сильнейшего внутреннего движения, аналогичного тепловому движению капли жидкости, как это рассматривалось в главе 5. Так же как тепловое движение молекул жидкости приводит к их испарению, т. е. к выбрасыванию наружу некоторых молекул, движение осколков деления приводит к выбрасыванию одного или нескольких нейтронов. Значение этого состоит в том, что нейтроны в свою очередь могут сталкиваться с другими ядрами урана, вызывая их расщепление и выделение новых нейтронов. Таким образом, число нейтронов быстро растет. Если мы предположим для простоты, что каждый акт деления дает два нейтрона и что несущественны потери нейтронов от других причин, кроме столкновений с ядрами урана, то первое деление даст два нейтрона. Каждый из них вызовет еще деление и поэтому еще два нейтрона, так что «второе поколение» будет состоять из четырех, следующее из восьми, затем шестнадцати нейтронов и так далее. Таким путем

полное число нейтронов, а потому и полная освобождающаяся энергия будут расти в катастрофических размерах, если не предпринять шагов, чтобы удержать процесс под контролем.

Очевидна важность этих фактов для возможности создания атомных бомб и реакторов, производящих атомную энергию регулируемым образом. Если бы мы рассматривали здесь вопрос о важности ядерной физики для практических целей, нам пришлось бы посвятить всю эту главу только подготовке к описанию деления ядра, но поскольку нашей задачей является изучение законов природы, мы должны упомянуть об открытии деления лишь как о небольшом эпизоде истории физики.

Однако открытие атомной энергии внесло важный вклад в развитие наших знаний о ядре не только потому, что привело к росту интереса к ядерной физике. Ядерные реакторы, в которых, как мы видели, освобождаются очень большие количества нейтронов и которые поэтому являются чрезвычайно мощными источниками нейтронов, следует прибавить к списку машин, пригодных к образованию интенсивных пучков снарядов, которыми можно бомбардировать атомные ядра и изучать их поведение.

Энергия, которая освобождается при процессах деления и используется в атомных реакторах и атомных бомбах, происходит от расщепления существующих в природе ядер, настолько больших, что при расщеплении выигрывается энергия.

На другом конце периодической системы можно получить энергию, соединяя вместе самые легкие ядра. Этот источник энергии для нас также имеет величайшее практическое значение: в конечном счете он является источником тепла на Солнце и звездах, без чего была бы невозможна жизнь; прямо или косвенно к нему сводятся все доступные нам источники энергии. Во внутренности Солнца имеют место столкновения между атомными ядрами, приводящие к соединению более легких элементов в более тяжелые, в особенности к образованию гелия и других элементов из водорода. Что же необходимо для этих процессов?

В случае расщепления тяжелого ядра, например ядра урана, мы имеем дело с объектом, который способен

взорваться сам по себе, так что требуется лишь «спустить крючок». В случае объединения двух легких ядер необходимо сблизить их друг с другом, чему препятствует их электрическое отталкивание. Уже отмечалось, что если мы попытаемся помочь этому процессу, используя протоны или другие заряженные частицы, ускоренные лабораторным путем, то большинство из них затормозится из-за трения до того, как им представится случай испытать близкое столкновение, а если они уже замедлились, то дальнейшим столкновениям препятствует электрическое отталкивание. При этом замедлении их энергия превращается в тепло. Единственной возможностью превращения заметных количеств вещества путем подобных столкновений является повышение температуры до такой степени, что хаотическое тепловое движение ядер даст им возможность сталкиваться, несмотря на отталкивательные силы. При таких высоких температурах ядра не теряют на трение своей энергии; проходя через вещество, они получают столько же энергии, сколько теряют, поддерживая среднюю кинетическую энергию, равную $\frac{3}{2} kT$ (k — постоянная Больцмана, T — температура), как мы видели в главе 4.

В центре Солнца температура достигает 20 миллионов градусов Цельсия, и при такой температуре кинетическая энергия любого ядра равна 30 000 электрон-вольт. Это соответствует потенциальной энергии двух протонов или дейтронов на расстоянии $5 \cdot 10^{-12}$ см друг от друга. Следовательно, протоны легко могут сблизиться до этого расстояния, несмотря на действующие между ними силы. Это недостаточно близко для прямого соударения, поскольку радиус самых тяжелых ядер только 10^{-12} см, а легкие ядра еще примерно в пять раз меньше. Однако помогают два обстоятельства: 1) обсужденное в главе 8 проникновение частиц сквозь потенциальный барьер, которое оказалось важным для процесса альфа-распада; 2) в хаотическом тепловом движении не все атомы имеют одну и ту же скорость, но некоторые движутся быстрее, а другие медленнее. Поэтому всегда некоторая доля атомов будет иметь скорость, достаточную для близкого соударения.

Но даже в предельных условиях внутри Солнца такие столкновения очень редки. Наверное, лишь один атом из миллиона испытывает такое соударение в течение года, иначе бы Солнце сгорело уже задолго до нашего времени.

Для искусственного получения термоядерных процессов надо предварительно получить температуру существенно более высокую, чем на Солнце, чтобы иметь заметный выход в разумный промежуток времени. Это, как легко видеть, исключает *) возможность использования этого процесса для непрерывного и контролируемого выделения энергии, как это возможно в случае энергии деления, поскольку не существует материала, могущего выдержать эти необычайно высокие температуры даже несколько секунд. Другое дело, когда энергия выделяется путем взрыва и стенки сосуда, содержащего состав и прочее оборудование, в любом случае будут разрушены. В то время, когда писалась эта книга, было объявлено, что Соединенным Штатам и России удалось взорвать такие «термоядерные бомбы». Хотя подробности не были опубликованы, принцип состоит в том, что энергия, выделяемая бомбой, основанной на делении, используется для нагревания специально подобранной смеси легких элементов до температуры такой же или более высокой, чем в центре Солнца, и поэтому начинается термоядерная реакция.

Исследуя, в поисках основных законов, строение вещества, мы нашли, что оно состоит из атомов. Мы нашли, что природа атома зависит от его ядра; масса ядра почти равна массе атома, а электрический заряд ядра определяет нормальное число электронов в атоме, а значит, и его химическое поведение, как и обычные физические характеристики. Мы видели, что ядро состоит из нейтронов и протонов в известной пропорции, и получили некоторые сведения о поведении нейтронов и протонов в ядре и о действующих между ними силах, хотя эти сведения все еще очень далеки от полноты.

Мы осуществили старую мечту алхимиков о превращении одного химического элемента в другой, по крайней

*) В настоящее время ведутся поиски возможностей управления термоядерными реакциями. (Ред.)

мере в малых количествах, хотя ценность любого драгоценного материала, полученного таким образом, далеко затмевается энергией, которую мы научились освобождать и которую по нашему собственному усмотрению мы можем использовать для своего блага или для уничтожения друг друга.

Два типа вопросов остаются еще нерешенными. Первый из них — относительно происхождения материи. Как были созданы ядра, составляющие материю вокруг нас? Почему одни элементы более распространены, чем другие? Почему одних изотопов каждого элемента гораздо больше, чем других?

Эти вопросы связаны с происхождением нашей планеты и историей вселенной. В настоящее время не имеют места никакие изменения в атомной структуре материи вокруг нас, за исключением небольшого количества уцелевших нестабильных элементов, как радий или уран. Но, вероятно, в далеком прошлом Земля и другие планеты были вместе с Солнцем массой очень горячей материи, в которой посредством термоядерных реакций могли образовываться большие ядра из меньших. Спекуляции о том, что было до этого, уводят нас в область космологии, науки о структуре и происхождении вселенной. В этой книге нет места обзору основных проблем космологии, и во всяком случае они не могут рассматриваться как часть твердо установленных законов природы. Область космологии изобилует очаровательными догадками, но еще немногие ее заключения свободны от противоречий.

Другой тип нерешенных вопросов касается точной природы ядерных сил и вопроса о том, какие могут существовать другие частицы кроме тех, которые мы уже встретили, т. е. электрона, протона, нейтрона, фотона, нейтрино и их комбинаций. Факты, которые будут описаны в последней главе, выведут нас на передовую линию поисков основных законов природы, они будут непосредственно связаны с этими вопросами.

ГЛАВА 11

МЕЗОНЫ И ДРУГИЕ НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ

Космические лучи и приборы для их изучения

Эта часть посвящена новым частицам, большинство которых было открыто только в последние несколько лет. Законы, которые определяют их поведение, до сих пор еще не вполне ясны, но уже сейчас видно, что эти частицы тесно связаны с ядерными силами. Следует ожидать, что более полное изучение новых частиц почти наверное даст нам ключ к нерешенным проблемам ядерных сил.

Большинство этих частиц было первоначально найдено в космических лучах. Поэтому будет полезно начать изложение с краткого описания этого явления.

Мы видели, что если заряженные частицы проходят через газ, то они сталкиваются с атомами газа и выбивают из них электроны. Образуются положительные ионы и свободные электроны, которые могут проводить электрический ток. Показать это можно проще всего с помощью электроскопа, примерно такого, какой показан на рис. 8, зарядив его и оставив в положении, когда верхняя пластина близка к другой металлической пластине, соединенной с землей, но не касается ее. Если теперь поместить поблизости радий или любой другой источник заряженных частиц, то электроскоп постепенно потеряет свой заряд. Это будет заметно по постепенному опаданию листков до вертикального положения. Причина этого заключается в том, что электрический заряд стекает через ионы воздуха на заземленную пластину. На первых порах это был удобный метод измерения количества излучения. Он и до сих пор применяется почти в том же виде в приборах, устанавливаемых в лабораториях, чтобы

контролировать общее излучение, которому может подвергнуться персонал.

Чтобы сделать этот метод более чувствительным, нужно стараться увеличить точность электроскопа и улучшить его изоляцию, чтобы картина не затемнялась токами, текущими по стенкам электроскопа. Было, однако, замечено, что даже в отсутствие каких бы то ни было радиоактивных материалов имеется слабая утечка заряда. Электроскоп продолжает терять заряд с малой, но постоянной скоростью. Изучая это явление, Гесс обнаружил, что эта «фоновая» ионизация не уменьшается, если окружить электроскоп толстыми стенками или поместить его под землю или под воду. С другой стороны, ионизация делается гораздо более интенсивной, т. е. электроскоп начинает терять свой заряд гораздо быстрее, если поднять его на большую высоту, например установить его на высокой горе, или поднять на самолете, или на воздушном шаре.

Гесс решил, что то, что он обнаружил, представляет собою излучение, которое приходит извне. Так как трудно себе представить его источник расположенным в верхних слоях атмосферы, то оно должно приходить из мирового пространства и быть в состоянии пройти через всю атмосферу. Эти выводы были полностью подтверждены в последующих работах. Когда приборы для обнаружения заряженных частиц были улучшены по их чувствительности и способности различать сорта частиц, наши знания о природе космического излучения сильно увеличились, хотя мы и не знаем еще точно, откуда оно приходит.

Сначала считалось само собой разумеющимся, что космические лучи представляют собой электромагнитное излучение, т. е. гамма-лучи, которые, проходя через вещество, могут освобождать электроны с помощью фотоэффекта или комптон-эффекта. Дело в том, что заряженные частицы, проходя через воздух, теряют энергию на трение. Чтобы достигнуть уровня моря и пройти через бетонные стены или толстые свинцовые пластинки, через которые, как было известно, космические лучи проходят, заряженные частицы должны были обладать энергиями, которые в то время казались совершенно фантастическими. Однако теперь мы знаем, что гамма-лучи вызывают лишь

малую часть ионизации, наблюдаемой на уровне моря, и что почти вся она вызывается заряженными частицами.

Присутствие последних можно доказать различными способами. Типичный метод заключается в использовании счетчиков, подобных описанному в главе 10. Такой счетчик представляет собой трубку, заполненную подходящим газом и имеющую внутри себя проволоку, причем между проволокой и трубкой приложена разность потенциалов, так что даже той малой концентрации ионов, которую создает заряженная частица, достаточно, чтобы начался слабый электрический разряд. Разряд такого счетчика показывает, что через него прошла заряженная частица, но мало говорит нам о ее природе.

Больше сведений можно получить от счетчиков, включенных «на совпадение». Это означает, что два счетчика, подобно счетчикам *A* и *B* на рис. 66, помещены поблизости один от другого и отмечающее устройство устроено так, что оно отмечает лишь случаи, когда оба счетчика разряжаются строго одновременно. Если это случится, то это значит, что либо одна и та же частица прошла через оба счетчика, либо две различные частицы случайно прошли одновременно через различные счетчики. Последняя возможность называется «случайным совпадением» и обычно не представляет интереса. Если время определяется точно и если число проходящих частиц поддерживать малым, то число таких случайных совпадений будет мало. Во всяком случае их можно учесть.

Таким способом можно изучать, проходят ли частицы через свинцовый блок данной толщины. Для этого достаточно поместить свинцовый блок между счетчиками, как это показано на рисунке, и наблюдать, насколько уменьшится число совпадений. Более тонкая техника позволяет изучать явление детальнее. Например, можно расположить три счетчика в одну линию и между первым и вторым поместить блок из одного вещества, а между вторым и третьим — из другого. Если теперь отмечать число случаев, когда срабатывают первый и второй счетчики и не срабатывает третий, то мы узнаем, сколько

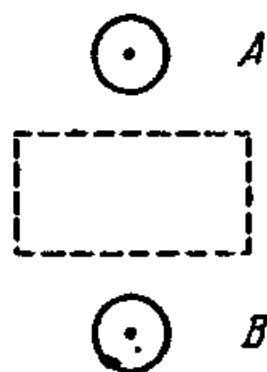


Рис. 66. Счетчики.

частиц прошло через первый блок и остановилось во втором.

Другим важным устройством для обнаружения частиц является камера Вильсона, которая также уже упоминалась в главе 10. Она позволяет фотографировать следы («треки») пролетающих через нее частиц. Частицы космических лучей, вообще говоря, столь редки, что камеру Вильсона обычных размеров необходимо, во всяком случае на уровне моря, фотографировать много раз, чтобы

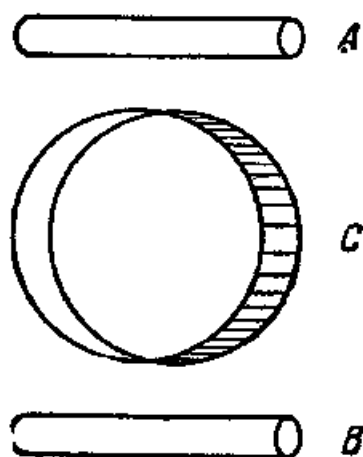


Рис. 67. Контрольные счетчики в камере Вильсона.

увидеть хоть один трек. Поэтому на каждую полезную фотографию получается очень много бесполезных. Этого можно избежать, комбинируя счетчики с камерой (рис. 67). Счетчики *A* и *B* расположены таким образом, что частица, которая пройдет по прямой через оба счетчика, должна также пройти через камеру Вильсона *C*. Совпадение между разрядами обоих счетчиков используется для запуска механизма камеры. Это означает, что камера «срабатывает», т. е. водяные капли конденсируются на треках, уже после того, как частица пролетела. Однако это не приносит вреда, так как ионы, образованные частицей, исчезают не очень быстро и остается достаточно времени, чтобы «туманный след» образовался и был сфотографирован. Таким образом, можно быть уверенным, что на каждой фотографии будет по крайней мере один трек частицы, которая в состоянии проникнуть через обе стенки камеры. Более того, эта техника позволяет отбирать определенные типы частиц, или частицы, с которыми произошли некоторые определенные события. Например, можно поместить свинцовый блок между камерой и счетчиком *B* или между *B* и поставленным ниже *B* третьим счетчиком. Такое устройство будет отбирать частицы, которые имели достаточно энергии, чтобы пройти через свинцовый блок, или, наоборот, частицы, которые остановились в нем.

Много сведений можно получить, поместив камеру Вильсона между полюсами сильного магнита. При этом

каждый трек искривится и по его кривизне можно судить о импульсе частицы.

Третий важный метод исследования частиц состоит в использовании фотографических пластинок. Уже давно было известно, что заряженные частицы, например альфа-частицы, проходя через чувствительный слой (эмульсию) фотопластинок, оставляют на нем после проявления ряд черных точек. Это происходит из-за ионизации атомов внутри маленьких зерен солей серебра, которые содержатся в фотоэмульсии. Электроны вызывают в зернах определенные химические изменения, которые заставляют зерна «проявляться», т. е. выделять в процессе проявления серебро.

В точности тот же процесс происходит в обычной фотопластинке, освещенной светом, с той только разницей, что в освещенной пластинке электроны освобождаются из-за фотоэффекта, а не из-за столкновений альфа-частиц с атомами.

Таким образом, под микроскопом путь быстрой частицы выглядит как ряд точек на обыкновенной фотопластинке. Если, однако, увеличивать скорость частиц, они будут образовывать все меньше ионов на своем пути, так как электрическое возмущение, которое они вызывают, проходя через атом, будет прекращаться так быстро, что атом вероятнее всего не успеет ионизоваться. Поэтому быстрая частица оставляет слишком мало следов на обычной фотопластинке и ее путь будет едва виден. Теперь, однако, имеются специальные пластинки, которые делают видимыми треки частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света.

Этот метод имеет два очевидных преимущества при исследовании космических лучей. Одно из них состоит в том, что пластинки можно экспонировать на длительное время. При этом будут сфотографированы следы всех частиц, прошедших через эмульсию за это время. Поэтому не будет являться препятствием для наблюдений слабая интенсивность, т. е. малое число частиц, проходящих через пластинку в одну минуту. Во время экспозиции пластинка не требует к себе никакого внимания. Другое преимущество состоит в малом весе, что позволяет поднять много таких пластинок на воздушном шаре или ракете на

большую высоту, где много больше космических частиц и где имеются такие виды излучения, которых нет на уровне моря. Еще одно специфическое преимущество будет отмечено далее.

Известные частицы

При детальном изучении космических лучей всеми этими способами выявилась очень сложная картина. Некоторые из найденных треков оказались принадлежащими обычным частицам, в частности электронам и позитронам. Вместе с гамма-лучами (т. е. фотонами высокой энергии) они образуют то, что известно под названием мягкой компоненты космических лучей. Это означает, что они тормозятся уже в сравнительно тонких слоях тяжелого вещества, например свинца. Мы знаем, что любая заряженная частица, например электрон, проходя через вещество, теряет энергию из-за трения, подобно тому, как она теряет ее, проходя через атом. Но если бы она теряла энергию лишь таким образом, то проникающая способность электрона очень большой энергии была бы еще очень велика, так как велик запас энергии, которую он может потерять. Но электрон, кроме того, теряет энергию на излучение. Если электрон пролетит близко от ядра атома, он резко отклонится под действием сильного электрического поля. При этом он потеряет часть своей энергии в виде гамма-излучения. Образовавшиеся фотоны в свою очередь, проходя через атомы, могут, как мы видели в главе 9, образовывать электронно-позитронные пары. В результате энергия первоначального электрона уйдет на образование одной или нескольких пар соответственно меньшей энергии. Эти пары могут также не только замедляться из-за трения, но и образовывать новые фотоны и новые пары. Этот процесс называется каскадным процессом или ливнем. По мере того как число частиц в ливне увеличивается, энергия каждой частицы уменьшается. Когда энергия электронов и позитронов уменьшится настолько, что они останавливаются из-за трения раньше, чем успевают излучить фотон, а энергия фотонов делается столь малой, что они не могут больше рождать пары, рост ливня прекращается.

Кроме этой мягкой компоненты, космические лучи содержат также протоны. Они также замедляются из-за тре-

ния, но они излучают очень мало гамма-квантов, так как они много тяжелее и не отклоняются столь сильно электрическим полем при прохождении через атом. С другой стороны, движение протона резко меняется при лобовом столкновении с ядром атома. Двигаясь в воздухе, частица пролетает в среднем несколько сотен метров, прежде чем ей посчастливится столкнуться прямо с ядром. Если это случится с протоном, то протон потеряет значительную часть своей энергии, а ядро разлетится на осколки. При таких столкновениях образуются также частицы нескольких новых видов, о которых будет идти речь дальше.

Протоны образуют основу космических лучей, той их части, которая приходит на Землю непосредственно из мирового пространства. То, что первоначальное излучение состоит из заряженных частиц, можно показать, сравнивая интенсивность космических лучей в различных частях земного шара. Вблизи магнитных полюсов Земли излучение гораздо сильнее, чем на экваторе. Это объясняется тем, что протоны, двигаясь в мировом пространстве по направлению к Земле, отклоняются ее магнитным полем, и если их энергия не слишком велика, они не могут достигнуть Земли. Медленные частицы могут достигнуть Земли только в том случае, если направление их движения случайно совпадает с направлением магнитных силовых линий. В этом случае они не отклоняются, так как сила, действующая в магнитном поле на ток, зависит только от той составляющей магнитного поля, которая образует прямой угол с током. Если мы теперь сравним Землю с магнитом, как это показано на рис. 13, а, мы обнаружим, что единственные прямые силовые линии — это те, которые начинаются у полюсов и уходят в бесконечность по прямой, соединяющей полюсы. Медленные протоны, следовательно, могут достигнуть Земли только у магнитного полюса. В любом другом месте существует минимальная энергия, которой должен обладать протон, чтобы достигнуть Земли, несмотря на отклонение в магнитном поле. Эта минимальная энергия тем больше, чем дальше мы находимся от полюса. Физик, занимающийся изучением космических лучей, может использовать Землю в качестве гигантского инструмента для выяснения действия первичных протонов различных энергий. Если

интересоваться протонами низких энергий, необходимо, следовательно, производить наблюдения вблизи полюса. Чтобы выделить влияние протонов крайне высоких энергий, надо работать вблизи магнитного экватора.

Теперь известно, что излучение, бомбардирующее земную атмосферу извне, содержит, кроме протонов, также и другие ядра, от гелия по крайней мере до азота, а вероятно и еще более тяжелые. Оказывается, что ядра водорода, т. е. протоны, и ядра других элементов смешаны в космических лучах в той же пропорции, в какой они содержатся в атмосфере Солнца и в других частях вселенной. Это дает нам важный ключ к пониманию происхождения космических лучей, но в настоящее время еще не имеется законченной теории на этот счет.

Тяжелые ядра можно обнаружить только на очень больших высотах, так как такие ядра имеют большую вероятность распасться на отдельные протоны и нейтроны при первом же столкновении с ядром в воздухе. Эти протоны и нейтроны далее продолжают свой путь самостоятельно вместе с осколками, которые они выбивают из ядер.

В результате таких столкновений в космических лучах, в атмосфере имеются также нейтроны. Мы знаем, что нейтроны не могут содержаться в той части излучения, которая приходит из мирового пространства, так как они имеют короткое время жизни, что было указано в главе 10.

Мезоны

Кроме этих знакомых объектов в космических лучах были обнаружены новые частицы, которые раньше известны не были. Первые доказательства существования этих незнакомцев были получены в начале тридцатых годов, когда было показано, что имеются заряженные частицы, которые могут проходить через толстые слои свинца, не испытывая заметных отклонений от прямого пути и не вызывая образования ливней или каких-либо дополнительных треков. Эти частицы не могли быть электронами, так как любой электрон достаточно большой энергии, проходя через свинец, должен вызывать ливень. Они не могли быть протонами, так как некоторые из них оказались отрицательными (и как мы теперь знаем, они

не вызывают деления ядер, даже если свинцовая пластинка достаточно толста, чтобы быть уверенным, что некоторые из этих частиц прошли через ядро).

Последующие измерения показали, что эти частицы легче, чем протоны, и много тяжелее, чем электроны. Как узнали вес такой частицы? Есть несколько способов изучать свойства частиц. Один из них — наблюдать пробеги, т. е. расстояния, на которых частица останавливается. Пробег является мерой энергии частицы, так как количества энергии, теряемой из-за трения на единице длины пути, очень близки для частиц разного рода (это утверждение не вполне точное, так как величина потерь зависит от скорости, но эта поправка может быть учтена). Можно также наблюдать в камере Вильсона или с помощью счетчиков отклонение частиц в сильном магнитном поле. Это отклонение зависит от импульса частицы. Можно наблюдать число ионов, которое образует частица на своем пути, считая число водяных капель вдоль трека в камере Вильсона или число зерен, образующих трек на фотографической пластинке. Это говорит нам кое-что о скорости частицы, так как вероятность выбить электрон из атома зависит от времени, которое затрачивает частица, чтобы пройти через атом. Наконец, можно наблюдать отклонение трека от прямой линии. Проходя через каждый атом, частица несколько отклоняется, и в результате множества таких отклонений в различных направлениях путь частицы делается слегка беспорядочным. Беспорядочное рассеяние зависит в основном от произведения импульса частицы на ее скорость.

Любых двух таких наблюдений, в принципе, достаточно, чтобы определить массу частицы. Но так как на практике погрешности этих измерений зависят от различных причин, необходимо приложить много изобретательности, чтобы определить массу с желаемой точностью.

Было найдено, что новые частицы имеют массу покоя, примерно равную 210 массам электрона, или, другими словами, немногим большую одной десятой массы протона. Такие частицы теперь называют мезонами, от греческого слова *μεσος* — средний, выражающего их промежуточное положение между протоном и электроном. Было найдено, что эти новые частицы, открытые Андерсоном и,

независимо, Блеккетом, живут очень недолго. В среднем примерно через 2 микросекунды, т. е. 2 миллионных доли секунды, они распадаются, причем единственным видимым продуктом распада является быстрый электрон. Этот процесс напоминает процесс бета-распада. Если в таком процессе энергия и импульс сохраняются, то должна образовываться по крайней мере еще одна частица. Это можно показать, рассмотрев процесс распада покоящегося мезона, т. е. мезона, не имеющего импульса. Так как электрон вылетает со значительной скоростью, т. е. со значительным импульсом, закон сохранения импульса требует, чтобы уносился равный по величине и противоположный по направлению импульс. Если бы образовывалась, кроме электрона, еще только одна частица, то она всегда имела бы тот же импульс, что и электрон. Следовательно, энергия распада, которая равна энергии покоя мезона, всегда распределялась бы между электроном и второй частицей в одной и той же пропорции. Например, если, как это имеет место в действительности, энергия распада много больше, чем энергия покоя как электрона, так и другой частицы, обе вылетали бы почти точно со скоростью света и энергия каждой была бы равна ее импульсу, умноженному на скорость света. В этом случае обе частицы имели бы при равном импульсе одинаковую энергию, равную точно половине энергии распада, т. е. половине массы мезона, умноженной на скорость света в квадрате.

Однако эксперимент показывает, что это не так. Когда мезон распадается, электроны вылетают с различными скоростями. Это означает, что кроме электрона образуются по крайней мере две невидимые частицы. Наиболее вероятным предположением в настоящее время является предположение, что распад мезона сопровождается вылетом двух нейтрино.

Это заключение делает процесс совершенно подобным процессу бета-распада. Точно так же, как при обыкновенном бета-распаде нейтрон превращается в три частицы, а именно в электрон, протон и нейтрино, так и здесь мезон превращается в электрон и два нейтрино.

Эта аналогия распространяется и на времена жизни. Времена жизни ядер, которые подвержены бета-распаду,

зависят известным образом от выделяющейся при бета-процессе энергии. Если мы теперь вычислим время жизни состояния, в котором может выделяться энергия, равная энергии покоя мезона, т. е. около 1600 Мэв , то получится верный результат — около двух микросекунд.

Такие мезоны составляют существенную часть космического излучения на уровне моря. На больших высотах их еще больше. По пути они распадаются и образующиеся при этом электроны являются главным источником мягкой компоненты, речь о которой шла выше.

Так как мезоны имеют короткое время жизни, то ясно, что они должны образовываться при каких-то процессах в атмосфере. Они не могут содержаться в первичном излучении и приходить прямо из мирового пространства, так как тогда они распались бы по пути. С первого взгляда может показаться, что даже мезоны, образовавшиеся в верхних слоях атмосферы, не могут достигнуть уровня моря. Действительно, двигаясь даже со скоростью света, они пролетели бы за две микросекунды всего только 600 м , что много меньше высоты атмосферы.

Эти соображения, однако, не верны по весьма интересной причине: дело в том, что многие мезоны имеют очень большую кинетическую энергию, так что они движутся со скоростью, очень близкой к скорости света. Наблюдатель, движущийся с той же скоростью, что и частицы, для которого, следовательно, они покоятся, нашел бы, что их время жизни равно двум микросекундам. Для того чтобы по данным, полученным движущимся наблюдателем, узнать, что получит покоящийся наблюдатель, мы должны учесть замедление времени, следующее из преобразований Лорентца (см. главу 6). Покоящемуся наблюдателю, следовательно, будет казаться, что частица живет много дольше. При этом время жизни увеличится во столько же раз, во сколько энергия частицы больше ее энергии покоя. Например, мезоны с энергией в $100\,000 \text{ Мэв}$, которая является еще вполне обычной, проживут в среднем 2000 микросекунд вместо 2 микросекунд. За это время они покроют расстояние в 600 км .

Мы видим, что замедление течения времени может оказаться совершенно осязаемым и имеет отношение

относительно не только к академическим вопросам, вроде сравнения показаний часов наблюдателей, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Уместно заметить здесь, что с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с мезонами, тот же результат получается вследствие лорентцева сокращения длины. В то время как для этого наблюдателя время жизни мезонов остается равным 2 микросекундам, высота атмосферы уменьшается для него в разобранном числовом примере в тысячу раз, так что времени жизни мезона оказывается достаточно, чтобы преодолеть это расстояние.

Может показаться удивительным, что наши мезоны не могут распасться иначе, чем в результате такого сложного процесса, как распад на три частицы. Это оказывается, однако, гораздо более естественным, если сделать весьма вероятное предположение, что мезоны, подобно электронам, имеют спин $\frac{1}{2}$. Тогда мезон не может превратиться в один электрон, так как в этом случае не могут одновременно выполняться законы сохранения энергии и импульса. Вместе с тем он не может распасться на электрон и одно нейтрино, так как такие две частицы вместе всегда имеют момент количества движения, равный целому числу единиц. Поэтому простейшим возможным распадом является распад на три частицы.

Теория Юкавы. Еще мезоны

Открытие мезонов явилось сильной поддержкой соображениям о природе ядерных сил, ранее выдвинутым японским теоретиком Юкавой. Поэтому уместно привести здесь краткое изложение аргументов Юкавы.

Юкава попытался найти удовлетворительное описание сил, действующих между двумя ядерными частицами, например между протоном и нейтроном. Известно, что эти силы являются короткодействующими, т. е. они действуют на расстояниях, меньших $2 \cdot 10^{-13}$ см, и сильно ослабевают, если расстояние между протоном и нейтроном превышает эту величину. Нельзя, однако, допустить существование сил, непосредственно связывающих частицы даже на малых расстояниях, так как согласно принципу относительности, который, как мы уже видели, часто указывает путь

при построении физической теории, никакое действие не может передаваться мгновенно или со скоростью, большей скорости света. Поэтому необходимо предположить, что ядерные силы передаются от протона к нейтрону и наоборот через некоторого посредника, который в случае ядерных сил играет ту же роль, что электромагнитное поле в передаче электрических сил. Подобно тому как каждый электрон вызывает некоторое возмущение электромагнитного поля, которое распространяется от точки к точке, пока не достигнет другого заряда (мы видели это в главе 2), должно существовать поле, которое передает ядерные силы.

Однако тот факт, что ядерные силы действуют лишь на коротких расстояниях, означает, что законы этого поля должны заметно отличаться от законов электромагнитного поля.

Рассуждая таким образом, Юкава пришел к заключению, что такое поле должно быть связано с частицами, которые в отличие от фотонов, имеющих массу покоя, равную нулю, должны иметь массу покоя, в несколько сот раз большую, чем масса электрона.

Не вдаваясь в математические тонкости, эти соображения можно понять, если вспомнить аргументацию главы 9, где мы связывали электрические силы между двумя частицами с испусканием «виртуальных фотонов». Один заряд может испустить «в кредит» фотон, который будет поглощен другим близлежащим зарядом. Если расстояние мало, «заем» может быть возвращен немедленно, и заряды будут обмениваться как длинноволновыми, так и коротковолновыми фотонами. Но если расстояние велико, пройдет большее время, прежде чем заем будет возвращен, и согласно соотношению неопределенности будет возможен лишь малый заем. Это соответствует тому, что в процессе будут участвовать лишь фотоны с малыми частотами, т. е. с большими длинами волн. На основании этих аргументов можно вывести закон обратной пропорциональности силы квадрату расстояния.

Теперь рассмотрим аналогичный процесс, в котором будут излучаться и поглощаться не фотоны, а новые частицы, имеющие массу покоя. Тогда, как бы велика ни была длина волны частицы, т. е. как бы ни был мал ее

импульс, ее энергия не будет меньше, чем mc^2 , где m — ее масса покоя. Передаваемая энергия будет, следовательно, не меньше, чем mc^2 , и по принципу неопределенности заем должен быть возвращен за время, не большее, чем $\frac{h}{mc^2}$. Так как взаимодействие может передаваться самое большее со скоростью света, оно может распространиться лишь на расстояние $\frac{h}{mc}$. Таким образом, образование и поглощение таких частиц приведет к появлению сил, действующих на расстояниях около 10^{-13} см, если мы предположим, что масса частиц в несколько сот раз больше массы электрона.

Казалось, что открытие в космических лучах мезонов подтверждает рассуждения Юкавы, и в течение десяти лет делались попытки отождествить мезоны, которые были найдены в космических лучах, с теми частицами, которые входили в теорию Юкавы. Эта точка зрения, однако, приводит к многочисленным противоречиям. Наиболее серьезное из них заключается в том, что мезоны, как оказалось, могут проходить через атомные ядра, причем с ними ничего существенного при этом не происходит. В то же время, если бы теория Юкавы была справедлива, они должны были бы очень легко поглощаться ядрами, причем их масса при этом процессе превращалась бы в энергию.

Эти трудности были разрешены только тогда, когда Поуэлл и его сотрудники открыли, что существуют два различных вида мезонов, которые они называют π («пи») и μ («мю») мезонами. μ -мезоны — это как раз те мезоны, которые главным образом изучались ранее. π -мезоны оказались новыми частицами. Они весьма сильно взаимодействуют с ядрами и, таким образом, ведут себя в соответствии с идеями Юкавы.

Работа Поуэлла была сделана при помощи фотопластинок. Изучая треки частиц космических лучей на таких пластинках, он наблюдал треки частиц, которые постепенно замедлялись и в конце концов останавливались. Это можно было видеть из того, что треки делались все жирнее по мере приближения к их концу (медленные частицы образуют больше ионов и, следовательно, больше

зерен на фотопластинках) и в то же время менее регулярными, извилистыми (медленные частицы легче отклоняются). Но в некоторых случаях в конце такого трека начинается трек новой быстрой частицы, имеющей значительную энергию. Подсчет числа зерен на треках обеих частиц показывает, что частицы двигались со скоростью, много меньшей скорости света, и, следовательно, не могли быть электронами, так как они проделали путь, во много раз больший, чем могли бы пройти электроны соответствующей скорости. Энергия второй частицы всегда оказывалась много большей, чем ее могло выделяться при каком-либо процессе в веществе эмульсии.

Единственное объяснение заключается в том, что первая частица превратилась в другую, меньшей массы, причем выделилась энергия, соответствующая разности масс. Массы обеих частиц можно узнать, изучая их треки.

С тех пор научились получать π -мезоны в лаборатории. Благодаря этому стало гораздо удобнее работать с ними, и многие подробности их поведения удастся выяснить непосредственно.

Так, удалось точно определить массу π -мезона. Она оказалась равной 272 массам электрона в отличие от 210 для μ -мезона. Было также найдено, что среднее время жизни π -мезона — только 10^{-8} секунд, другими словами, в сто раз меньше, чем μ -мезона. Спустя это время π -мезон распадается на μ -мезон и какую-то невидимую частицу, без которой не может удовлетвориться закон сохранения импульса. В отличие от распада μ -мезона, где образуются две нейтральные частицы, здесь образуется только одна. Это, вероятно, опять нейтрино, хотя это еще не доказано.

Короткое время жизни и есть та причина, по которой π -мезоны не были замечены до Поуэлла. За среднее время жизни π -мезон, движущийся даже со скоростью света, может пройти всего лишь около 20 футов и соответственно меньшее расстояние при меньших скоростях. Это означает, что в воздухе или в камере Вильсона он обычно будет распадаться ранее, чем затормозится из-за трения. Если частица распадается на лету, то очень трудно узнать, с чем именно мы имели дело. Во всяком случае, так как

каждый π -мезон распадается на μ -мезон, а последние живут в сто раз дольше, следует ожидать, что μ -мезоны должны встречаться гораздо чаще.

Таким образом, фотографическая пластинка, которая делает видимыми треки частиц, движущихся в твердом теле, является идеальным способом изучения короткоживущих частиц, так как они останавливаются в ней много быстрее, и следовательно, их можно изучать, наблюдая под микроскопом более короткие треки.

Вернемся теперь к процессам, при которых мезоны рождаются в ядерных столкновениях, происходящих в космических лучах или в лаборатории. Прежде всего ясно, что эти процессы требуют энергии, равной по крайней мере энергии покоя мезона, которая составляет примерно 140 Мэв. Однако если быстрый протон сталкивается с покоящимся протоном, общий импульс должен сохраняться, и поэтому частицы, оставшиеся после столкновения, должны иметь значительный импульс. Это означает, что они должны также иметь кинетическую энергию, которую нужно прибавить к их энергии покоя. В действительности наименьшая энергия, которую должен иметь протон, чтобы образовать при столкновении с протоном π -мезон, близка к 300 Мэв.

π -мезоны обильно образуются при столкновениях протонов или нейтронов с ядрами при энергиях выше 300 Мэв, и во многих лабораториях мира теперь имеются действующие ускорители, которые могут давать частицы требуемых энергий. Аналогичные явления происходят при вхождении первичных космических лучей в атмосферу. При столкновениях частиц космических лучей с ядрами воздуха они образуют π -мезоны, которые почти сразу же распадаются на μ -мезоны, а те в свою очередь — на электроны.

Кроме заряженных мезонов, существуют также незаряженные, или нейтральные. Они тоже были предсказаны теоретически до того, как были открыты экспериментально. Нейтральный π -мезон интересен как единственная до сих пор частица, которая была образована на ускорителе раньше, чем обнаружена в космических лучах *).

*) См. примечание редактора в конце главы. (Ред.)

Имеются следующие теоретические причины ожидать существование нейтральных π -мезонов. Мы видели, что идеи Юкавы объясняют силы между нейтроном и протоном с помощью представлений о том, что протон может образовать «в кредит» мезон, который потом поглощается нейтроном, и наоборот. Далее, если существуют только заряженные мезоны, то протон может образовать только положительный мезон. При этом протон, чтобы общий заряд сохранился, должен сам превратиться в нейтрон. Нейтрон, поглотив положительный мезон, превращается в протон.

Конечный результат заключается в том, что нейтрон и протон обмениваются зарядом; и действительно, как мы упоминали в главе 10, известно, что такие обменные силы существуют. Но тот же механизм никогда не смог бы привести к какому-либо взаимодействию между двумя одинаковыми частицами, например двумя протонами. Если протон образует положительный мезон, последний не может быть поглощен другим протоном, если только протон не превратится в частицу с положительным зарядом, равным двум зарядам электрона. Но такие частицы, по-видимому, не существуют. С другой стороны, протон не может образовать отрицательный мезон без того, чтобы не превратиться в ту же частицу с удвоенным зарядом. Однако известно, что ядерные силы между двумя протонами столь же сильны, как и между протоном и нейтроном. Это проще всего объяснить, предположив, что существуют не только заряженные, но и нейтральные мезоны.

Они действительно были найдены в опытах с быстрыми протонами. Чтобы их обнаружить, потребовалось проявить немало проницательности, так как их среднее время жизни еще меньше, чем время жизни π -мезонов. Оказалось, что они живут только около 10^{-14} секунды. Даже когда они движутся со скоростью, близкой к скорости света, они проходят до того, как распадутся, только $1/1000$ мм. После этого образуются два фотона, которые, если мезон двигался медленно, должны вылететь в противоположных направлениях, с энергией каждого около 70 Мэв. Эти фотоны в свою очередь обнаруживаются по электронным парам, которые они образуют, проходя через

вещество. Мы видим, что регистрация нейтральных π -мезонов производится вдвойне косвенным путем. Тем не менее опыты, впервые произведенные Пановским и другими, доказали их существование весьма убедительно. Позднее эти частицы были обнаружены и в космических лучах.

Масса нейтральных π -мезонов несколько меньше, чем заряженных, поэтому нейтральные π -мезоны больших энергий могут образовываться при столкновениях заряженных π -мезонов с ядрами.

Как заряженные, так и нейтральные π -мезоны не имеют спина. Доказательства этого слишком специальные, чтобы можно было приводить их здесь. Этот результат хорошо согласуется с точкой зрения Юкавы, так как для нее существенно, чтобы протон мог превращаться в нейтрон плюс π -мезон и наоборот. Так как и протон и нейтрон имеют спин, равный половине, то такие процессы возможны, если π -мезон имеет спин 0. Но эти рассуждения не исключают и того, что он имеет спин, равный целому числу единиц, так как в этом случае можно всегда удовлетворить закону сохранения момента количества движения за счет орбитального движения частицы. Однако спин, равного половине, быть не может.

Этот результат интересен в связи с имевшимися ранее трудностями в нахождении волн, описывающих заряженные частицы без спина. К счастью, еще задолго до открытия мезонов было показано, что четырехкомпонентное волновое уравнение Дирака не является единственной возможностью описания волн, соответствующих в теории относительности заряженным частицам, так что открытие заряженных бесспиновых частиц само по себе не доставляло новых трудностей.

В настоящее время несколько лабораторий изучают поведение π -мезонов, в частности при их столкновениях с нейтронами и протонами. Вопрос быстро перешел из стадии нахождения новых процессов в стадию детального количественного исследования. Можно было надеяться, что эти открытия, которые такими различными способами подтвердили идеи, выдвинутые Юкавой для объяснения ядерных сил, укажут теперь путь, на котором эти идеи приобретут форму количественных законов. Но, к нашему

сильному разочарованию, в этом направлении до сих пор было достигнуто мало прогресса из-за новых и неожиданных трудностей.

Главная из них заключается в том, что мезонное поле, окружающее протон или нейтрон, гораздо сильнее, чем электромагнитное поле, окружающее электрон, поскольку ядерные силы на малых расстояниях много сильнее, чем электрические силы между электронами и позитронами на соответствующих расстояниях. Этот факт был подчеркнут в главе 10. Это вносит сильные усложнения. Например, когда мы описывали в главе 9 взаимодействие между электронами и фотонами, которые могли испускаться и вновь поглощаться, мы могли быть уверены, что вероятность того, что два фотона присутствуют одновременно, в большинстве случаев пренебрежимо мала. Точно так же при столкновении двух электронов или электрона и протона в большинстве случаев не будут испускаться фотоны больших энергий. Редко будет испускаться один фотон и еще реже два. Все это происходило потому, что число $\frac{2\pi e^2}{\hbar c}$, которое мы ввели в главе 9 и которое является мерой взаимодействия электрона с окружающим полем, очень мало, примерно $\frac{1}{137}$. Соответствующая величина для мезонов много больше, вероятно больше единицы. Поэтому протон будет столь же охотно занимать энергию, достаточную, чтобы образовать два, три или более π -мезонов, как и достаточную для образования одного. Действительно, в столкновениях, в которых имеется достаточно энергии, чтобы образовать больше чем один реальный мезон, как в недавних экспериментах в Брукхэйвенской лаборатории с ускорителем, дающим протоны с энергией в 3000 Мэв, два мезона образуются чаще, чем один.

В результате проблема того, какие следствия можно ожидать из различных частных форм законов мезонных взаимодействий, до сих пор остается нерешенной. Мы не знаем, будет ли следующий шаг вперед остроумным математическим открытием, которое поможет нам пролить свет на эти трудные вопросы, или из опыта будет получен ключ, с помощью которого будут изменены существующие законы.

Еще частицы. Открывается новая глава

Как μ -мезоны, так и заряженные и нейтральные π -мезоны были открыты в соответствии с нашими ожиданиями, так как μ -мезоны казались, а π -мезоны действительно являлись подтверждением хотя и смелых, но весьма правдоподобных догадок. Не было особых причин ожидать, что открытия новых частиц будут продолжаться. Однако они продолжались, и исследование уже обнаружило сбивающее с толку разнообразие новых частиц, причем их количество все возрастает по мере увеличения точности экспериментов.

Одна из этих частиц, вероятно первая открытая из этой группы, теперь называется Λ («лямбда»)-частицей. Эта частица — нейтральная и распадается на протон и отрицательный π -мезон. В этом распаде выделяется энергия 37 Мэв. Другими словами, Λ -частица имеет массу, равную массе протона, плюс масса π -мезона, плюс 72 массы электрона. Ее среднее время жизни — примерно 10^{-10} секунды. Она имеется в космических лучах. Первый пример такого типа был обнаружен на фотографии, полученной с камерой Вильсона, помещенной на уровне моря, но здесь такие частицы очень редки, и большинство их было обнаружено в камерах Вильсона, поднятых на горы.

Недавно такие частицы были порождены искусственно. Они были найдены при прохождении π -мезонов больших энергий через вещество. π -мезоны производились Брукхэйвенским ускорителем. Процесс, при котором они образуются, вероятно, сложен, и ясно, что вместе с этими частицами образуются и другие. Это так называемые θ^0 («тета-нуль»)-частицы, которые также были найдены в космических лучах*).

θ^0 — нейтральная частица, со временем жизни также около 10^{-10} секунды; она распадается на два π -мезона. При этом выделяется энергия, несколько бо́льшая 200 Мэв. Другими словами, ее масса покоя несколько меньше 1000 электронных масс. Третья частица — заряженная, ее называли τ («тау»)-частицей. Она имеет время жизни

*) В настоящее время приняты другие обозначения. См. примечание редактора в конце главы. (Ред.)

примерно то же, что и предыдущие, и распадается на три π -мезона. Энергия распада — примерно 70 Мэв.

Имеются и другие частицы, например κ («каппа») — заряженная частица, которая распадается на μ -мезон и одну или две нейтральные частицы, или χ («хи») — частица, которая распадается на заряженный π -мезон и нейтральную частицу. Сейчас производится большая работа по систематизации этих частиц и их свойств, но за приписанными им символами пока еще не видно ясной картины их взаимных связей. Нет пока никаких указаний и на то, насколько еще будет увеличиваться их список.

Необходимо иметь в виду, что время жизни 10^{-10} секунды, которое кажется очень малым на той временной шкале, которой мы пользуемся, еще очень велико по сравнению с частотами, которые соответствуют таким частицам. Поэтому не будет неожиданностью, если окажется, что существует еще очень много новых частиц с гораздо меньшими временами жизни, обнаружить которые пока трудно. Мы имели один пример такой короткоживущей частицы, нейтральный π -мезон. Он живет так мало, что место, где он рождается, можно отличить от места, где он распадается, только с помощью самой тонкой техники. Существование таких частиц можно доказать только косвенным образом. В случае нейтрального π -мезона это оказалось сравнительно легко, так как имелись теоретические основания ожидать, что такая частица существует, и были некоторые указания на то, каково ее поведение.

Одна частица, которая еще не открыта, уверенно предсказывается теорией. Это отрицательный протон, или антипротон. Чтобы понять причину такого предсказания, нам достаточно вспомнить обсуждавшуюся в главе 9 кажущуюся трудность с электронами в состояниях отрицательной энергии и тот путь, который привел к идее положительных электронов, т. е. антиэлектронов. Там имелись двойники электронов — положительные электроны, которые в некотором смысле — то же самое, что отсутствие электрона в состоянии отрицательной энергии. Точнее, позитрон и обычный электрон могут исчезнуть, причем их энергия превращается в излучение.

Что касается протона, то здесь положение совершенно аналогичное. Законы, управляющие протонными волнами,

также приводят к протонам в состояниях отрицательной энергии, с поведением совершенно нелепым, если только мы не избежим этой трудности тем же способом, что и в случае электронов, а именно, если мы не предположим существование антипротонов, т. е. протонов с отрицательным зарядом, которые могут аннигилировать с обыкновенными протонами, причем их масса будет превращаться в энергию. (Вероятнее всего, что эта энергия будет выделяться в виде мезонов.) Чтобы породить такую протонную пару, необходима энергия, грубо говоря, в 2000 Мэв. Если пара порождается при столкновении быстрого протона с другим, покоящимся, как это обычно бывает в лабораторных условиях и при столкновениях в космических лучах, то быстрый налетающий протон должен иметь значительно бóльшую энергию, так как четыре частицы, остающиеся после столкновения (два протона и новая протонная пара), должны еще двигаться, чтобы сохранить первоначальный импульс. Если произвести подсчеты, то окажется, что кинетическая энергия протона должна быть по крайней мере в шесть раз больше его энергии покоя, другими словами, составляет около 6000 Мэв. Такие энергии пока еще недостижимы в лаборатории, но сейчас строятся ускорители, которые превзойдут этот предел. Они дадут нам ответ на вопрос, являются ли правильными наши догадки об отрицательных протонах.

В космических лучах имеются протоны значительно бóльших энергий, и следует ожидать, что они должны иногда рождать антипротоны. Однако антипротоны очень редко будут встречаться в условиях, когда их легко опознать. Например, так как они образуются при крайне энергичных столкновениях, они будут в большинстве случаев двигаться столь быстро, что не будут заметно отклоняться какими бы то ни было используемыми магнитами, и поэтому нелегко будет установить, что они отрицательны. В треке такой частицы не будет ничего необычного, если только не удастся случайно поймать ее в самом конце ее пробега, когда она почти остановилась, а это не часто случается. Тот факт, что отрицательных протонов до сих пор не наблюдали в космических лучах, не является, таким образом, доказательством того, что они не существуют.

На этих коротких замечаниях мы прервем неоконченный рассказ о новых частицах. Здесь мы определенно достигли неисследованных границ физики. Отношение этих частиц к законам природы, которые являлись нашей главной темой, скорее отрицательное — они показывают неполноту этих законов в том виде, в каком мы их знаем сегодня. Но не вызывает сомнения, что по мере того, как наше понимание этих недавних открытий будет развиваться как путем получения новых экспериментальных результатов, так и путем нахождения законов, лежащих в их основе, мы придем к выводу, что наша современная форма законов природы не неправильна, а неполна *).

*) Со времени написания книги Пайерлса было открыто еще несколько новых частиц. Поэтому мы приведем здесь список всех известных элементарных частиц с их современными обозначениями в порядке возрастания их массы покоя.

Первую группу составляют легкие частицы. Сюда относятся γ -кванты, т. е. фотоны. Их масса покоя равна нулю. Сюда же относятся и ν^0 — нейтрино с массой, по-видимому, равной нулю, и e^\pm — электроны и позитроны (индекс $+$ или $-$ показывает заряд частицы, 0 — то, что частица не заряжена).

Далее идет группа легких мезонов. В нее входят μ^\pm -мезоны с массой примерно $206 m_e$ (m_e — масса покоя электрона), π^\pm -мезоны с массой $273 m_e$, π^0 -мезоны с массой $264 m_e$.

Другую группу мезонов составляют K -мезоны (по старой терминологии κ , τ и χ , θ^0). Это K^\pm -мезоны с массой $967 m_e$, K^0 и \bar{K}^0 — нейтральный K -мезон и анти- K^0 -мезон с массой $974 m_e$.

Далее идут нуклоны. К ним относятся p^\pm -протоны и антипротоны (масса $1836 m_e$), а также n^0 и \bar{n}^0 — нейтроны и антинейтроны с массой $1839 m_e$. Антипротоны, существование которых давно предсказывалось теорией, были открыты в октябре 1955 г. Антинейтроны, открытые вскоре после антипротонов, — это частицы, не имеющие электрического заряда и отличающиеся от нейтронов знаком магнитного момента. Антинейтроны могут аннигилировать с нейтронами.

Известны частицы и более тяжелые, чем нуклон. Это — гипероны. К ним относятся Λ^0 с массой $2183 m_e$, Σ^\pm («сигма») — частицы с массой $2328 m_e$ и Σ^0 — с массой $2332 m_e$, а также т. н. «каскадные гипероны»: Ξ^0 («кси») — частица с массой $2566 m_e$, Ξ^- — с массой $2580 m_e$.

К настоящему времени экспериментально установлено существование антигиперонов $\bar{\Sigma}^\pm$ и $\bar{\Sigma}^0$. Доказано также, что кроме нейтрино, существует и антинейтрино ($\bar{\nu}^0$). [Прим. ред.]

ГДЕ МЫ ОСТАНОВИЛИСЬ?

Наш обзор законов природы охватил физику от самого ее возникновения как точной науки до недавних открытий, от закона инерции до мезонов.

Как уже подчеркивалось, каждый новый этап в развитии следует рассматривать не как ниспровержение того, что было известно прежде, а как расширение и обогащение прошлого, так что, вообще говоря, старая работа сохраняет свое значение в соответствующей области. Конечно, какая-то часть из прошлых работ впоследствии оказывалась ошибочной, будучи основана на неточных данных, или неправильных рассуждениях, или на гипотезах, которые не подтвердились. В нашем кратком рассказе о таких работах вообще не говорилось, хотя надо помнить, что отнюдь не каждая идея даже больших физиков выдержала испытание, что приходится перепробовать много таких идей, прежде чем одна оправдает себя.

Другой общий вывод состоит в том, что с ростом наших знаний в результате решения некоторых проблем возникают новые проблемы и трудности. Вопросы, которых мы касались в последних главах, даже не возникли бы без сведений, содержащихся в ранних главах. По мере развития науки количество нерешенных проблем в иные времена казалось чудовищным, тогда как в другие — их становилось гораздо меньше. В какое-то время быстро одно за другим следуют новые открытия, не укладывающиеся в привычную схему, в другое — дело выглядит таким образом, как будто мы приближаемся к окончательному знанию законов физики. Успехи ньютоновской механики породили оптимистический взгляд, что все свойства материи можно в конечном итоге свести к законам механики; даже Максвелл стремился подкре-

пить свои знаменитые законы электромагнитного поля посредством механической модели. Только позднее, по истечении времени, достаточного, чтобы законы Максвелла стали привычными, и когда идеи теории относительности пролили на них дополнительный свет, стало ясно, что эти законы столь же просты сами по себе, как и законы механики, и что нет никакой необходимости сводить одни к другим.

После того как были уяснены механические и электромагнитные законы, некоторые люди полагали, что теперь законы физики стали полными. Общей тенденцией всех учебников, написанных в начале этого века, было представить физику, как в основном замкнутый предмет, без каких бы то ни было указаний на неразрешенные проблемы. Конечно, было хорошо известно, что характеристики различных веществ не могут быть получены из каких бы то ни было известных законов, но это не рассматривалось как проблема, подлежащая изучению. Удельный вес свинца или электрическое сопротивление меди, твердость алмаза или окраска иода, — это были данные, которые физики использовали в качестве сырьевого материала, но которые они не старались объяснить.

Что законы физики применимы также и к изучению структуры вещества, поняли уже значительно позже, равно как поняли и необходимость изыскивать основные законы, ответственные за все разнообразие. Мы видели в главах 4 и 5, как постепенно эти проблемы приобретали свою форму, а в главах 7 и 8 — как создание квантовой механики позволило дать почти полное объяснение свойствам вещества, исключая, в основном, строение ядра.

Следовательно, одно время опять проблема основных законов казалась простой и полное ее решение близким. Все понимали, что картина не может быть полной, пока не исследованы свойства ядер, но о них так мало тогда знали, что, казалось, для их объяснения многого не потребуется. В то время (до открытия нейтронов) считалось, что ядра содержат протоны и электроны. Конечно, неизвестно, как такая комбинация из электронов и протонов могла бы удерживаться вместе, но изучение электронов с большими скоростями всегда доставляло беспо-

койства, и поэтому ожидалось, что решение обеих проблем взаимосвязано. Тогда знали только две элементарные частицы, протон и электрон, и помимо отношения их масс имелась еще только одна безразмерная величина (т. е. единственная комбинация физических постоянных, не зависящая от единиц, в которых они выражаются) — постоянная тонкой структуры $\frac{2\pi e^2}{hc}$. Предполагалось, что

не так уже много лет понадобится, чтобы объяснить оба эти числа, т. е. объяснить, почему все электроны и протоны имеют наблюдаемую величину электрического заряда и почему протоны приблизительно в 1840 раз тяжелее электронов. Казалось, еще несколько лет, и все основные законы физики будут познаны.

Я не хочу утверждать, что многие физики в то время всерьез придерживались этого взгляда; в действительности большинство из них понимало, что углубление знаний влечет за собой новые проблемы. Но этой точки зрения, исходя из известных в то время фактов, можно было придерживаться с полным основанием. С тех пор прошло около 25 лет, и вместо картины почти полной законченности физика теперь производит впечатление скорее такого предмета, где открытых вопросов больше, чем окончательных ответов, что я и старался показать в двух последних главах. Количество новых частиц неуклонно возрастает, а с ним возрастает список их характеристик (таких, как отношения их масс, времен жизни, их взаимодействий), так что в наше время нет недостатка в данных для проверки какой бы то ни было новой теории. Однако пока не видно нити, позволившей бы кому-нибудь создать такую теорию. Следующий этап, на котором была бы устранена эта явная неразбериха, может наступить завтра, но может и запоздать на много лет. Любые предположения о том, в чем он будет состоять, могут оставаться только фантастическими догадками. Возможно, однажды наши знания о фундаментальных законах физики станут столь полными, что физика превратится в законченный предмет, основанный на известных принципах, в том смысле, в каком ньютоновская механика, применяемая к объектам повседневной жизни, является сегодня замкнутой в себе наукой. Но столь же вероятно, что такое окончательное

завершение всегда будет оставаться за пределами досягаемости; как далеко ни проникали бы наши изобретательность и любопытство, вслед за каждым новым углублением нашего знания будут открываться новые проблемы, о существовании которых мы не подозревали.

Если даже мы обнаружим однажды, что наши знания основных законов неодушевленной природы являются полными, это не будет означать, что мы «объяснили» все в неодушевленной природе. Максимум того, что нам удалось бы сделать, это показать, как все сложные явления нашего опыта выводятся из некоторых основных законов. Но как объяснить сами эти законы? В дни, когда казалось, что все сущее основано на законах механики, легко было поддаться иллюзии, что эти законы самоочевидны, хотя в действительности готовность нашего ума принять их родилась из привычки прилагать их к материальным предметам повседневной жизни.

Первый вопрос, который задает нам наше любопытство при изучении окружающих нас тел, начинается с «почему»; исследуя каждый факт все глубже и глубже, мы в конце оставляем основное «почему» без ответа. Иначе и не может быть, поскольку под объяснением, ответом на «почему», мы всегда понимаем демонстрацию того, что рассматриваемый факт следует из некоторых принятых законов или принципов. Всякое объяснение явлений природы состоит поэтому в сведении их к некоторым фундаментальным законам. Поиски объяснения самих этих законов означали бы сведение их к некоторым другим законам.

Иногда люди, склонные к философским обобщениям, пытаются показать, что основные законы, такие как законы Ньютона, в действительности самоочевидны и вытекают из некоторых общих принципов, в которых мы можем быть уверены даже помимо каких бы то ни было знаний об окружающем нас мире. Такие попытки, конечно, рискованны, поскольку самый чудесный вывод законов природы из абстрактных принципов должен рухнуть, если в свете более поздних открытий окажется, что сами эти законы должны быть модифицированы. Если когда-нибудь наши знания законов физики оказались бы близки к завершению, то тогда тот, кто хочет, мог бы без

опаски доказывать, что эти законы не могут быть иными, чем они есть на самом деле.

Но для ученого они останутся тем же, чем они являются в настоящий момент, законами, выведенными из нашего опыта, проверенными на основе того, остаются ли их предсказания справедливыми в новых обстоятельствах, и предметом дальнейшей ревизии, когда это необходимо,— все это до тех пор, пока они помогают нам систематизировать наши наблюдения.

Возможно, наше мнение, что в конце концов правильные законы должны быть просты, является предубеждением. Мы испытываем некоторое интеллектуальное удовлетворение, когда оказывается, что простые законы соответствуют фактам, хотя понятие простоты или сложности — это отчасти дело привычки мышления, абсолютного же критерия здесь нет.

Эту книгу нельзя закончить, не подчеркнув вновь, как много важных вещей в ней было опущено. Совсем не затрагивалась космология, т. е. проблемы строения вселенной как целого, и связанная с ней область — космогония, проблема истории и происхождения мира такого, как мы его видим. Точки соприкосновения у нас были. Смотря на таблицу ядер или изотопов, встречающихся в природе, нельзя не удивляться, почему некоторые из них распространены больше других; ответ на это лежит, очевидно, в тех процессах, при которых в давние времена образовывались эти ядра. Или если, как утверждают некоторые авторы, вселенная остается в неизменном состоянии, распространенность различных элементов или изотопов должна зависеть от способа, которым поддерживается это постоянное состояние. Используя космические лучи в качестве источника частиц большой энергии, нельзя удержаться от догадок по поводу того, откуда они могут приходить, хотя это и несущественно при изучении их действия.

Главным оправданием того, почему такие проблемы не упоминались, служит недостаток места; кроме того, эти вопросы пока не связаны с рассмотренным нами материалом в том смысле, в каком связаны теория относительности и квантовая механика. Более того, правильней сказать, что в этих предметах пока больше досужих

домыслов и гипотез, чем проверенных фактов. Множество интересных открытий, касающихся вселенной в целом, не привело пока к законам, которые могли бы быть установлены с такой же степенью уверенности, как те, что были описаны в этой книге.

Гораздо более широкой областью, которой мы не касались, является проблема жизни. Мы говорили о природе так, как будто в ней нет ни растений, ни животных, ни человека. Причина этому та же; о биологических науках в равной мере можно сказать, что они еще не достигли той ступени, на которой становятся очевидными простые основные принципы, хотя, возможно, специалисты в области биологии стали бы оспаривать это утверждение.

Вопрос о том, что могло бы связать законы неодушевленной материи, обсуждавшиеся раньше, с законами живой материи, которые могут быть развиты в будущем, относится, конечно, к области спекуляций.

В той мере, в какой это известно и где это может быть проверено, живая материя, по-видимому, следует общим законам физики. Движение частей нашего тела как будто следует тем же законам механики, что и части какой-либо машины. Производимая нами работа и вырабатываемое тепло, по-видимому, сбалансированы с количеством горючего в нашей пище. Химические реакции, которые могут быть идентифицированы в живом теле, протекают так же, как в опытной колбе.

Но на этом основании нельзя сказать, что законы физики неодушевленной материи смогут полностью объяснить живой организм. Мне кажется более вероятным, что верно обратное и что в жизнедеятельности проявляется нечто только ей свойственное, не получающее объяснения в нашем описании неживой природы. Эти особые черты могут существовать только там, где мы имеем дело с живой материей. Или, иначе, возможно, они присутствуют повсюду, но не существенны для свойств неодушевленной материи и поэтому не были еще там обнаружены. С этой последней возможностью дело обстоит бы так же, как в теории относительности: обязанные ей поправки существуют, в принципе, также для медленных объектов; поезд, конечно, испытывает сокращение Лорентца; имеется

небольшая неоднозначность в последовательности протекания событий для пассажира в поезде и стоящего снаружи, но эта разница столь ничтожна, что о ней совершенно не стоит помнить в связи с реальными поездами. Аналогично, квантовая механика принципиально применима к теннисному мячу, но поправки, такие, как дифракционные эффекты, к которым она приводит, будут в обычных случаях слишком малы, чтобы их стоило принимать во внимание. Точно так же, возможно, новые законы, которые должны быть призваны объяснить живую материю, в принципе привели бы к модификации нашего описания поезда, теннисного мяча или атома, но изменения, которые отсюда в этом случае вытекали, были бы пренебрежимы, они были бы существенны только для живой материи. Пока нельзя быть уверенным, какая из этих точек зрения правильна.

Во всяком случае наши взгляды на связь между жизнью и физикой подвержены влияниям изменений, произошедших в физике за последние пятьдесят лет. Перед этим господствовало мнение о возможности полностью детерминированного описания природы, т. е. считалось, что в некоторый момент можно определить положение и скорость каждого из атомов и каждого электрона в каждом из атомов; законы механики и электричества позволили бы затем вычислить состояние системы для любого другого момента времени. В такой детерминистской картине существование живой материи привело бы к ряду сложных проблем. Если бы мы наблюдали за поведением молекул, атомов и электронов внутри живого тела, то они двигались бы в точном соответствии с обычными законами физики, а если это так, то может ли жизнь быть лишь весьма сложным результатом проявления физических законов, вроде вычислительной машины или паровой машины? С другой стороны, если некоторые из молекул не подчиняются законам физики, почему это происходит только в живом организме? Из квантовой механики мы знаем, что эти вопросы бессмысленны. Мы никак не можем получить сведения о движении даже одного атома, достаточные, чтобы предсказать его поведение в будущем с определенностью; как мы видели в главе 7, мы впадаем в противоречие, постулируя, что всякий вопрос имеет смысл, не конкретизируя того наблюдения, посредством которого можно проверить ответ

на него. В живой материи это соображение выходит за пределы, налагаемые принципом неопределенности в квантовой механике.

Чем больше хотелось бы нам знать о состоянии атомов внутри живого организма, тем более грубым должно быть вмешательство в него, сопровождающее наше измерение; помимо неопределенностей, вносимых в другие физические данные, как требует принцип неопределенности, имеются более сильные ограничения, состоящие в том, что живое может подвергаться лишь вполне определенным воздействиям, иначе оно перестанет быть живым. То, что это ограничение никоим образом не является академическим, демонстрируется тем фактом, что наименьшие и, вероятно, в известном смысле наиболее простые объекты изучения в биологии, такие, как вирусы, делаются доступны зрению лишь в электронный микроскоп. То, что мы при этом видим, не есть живой вирус, поскольку он не может пережить бомбардировку быстрыми электронами, которой мы его подвергаем. Мы видим только его останки. Это, конечно, дает важные сведения. Но отсюда ясна безнадежность наблюдать вирус в микроскоп с таким увеличением, чтобы можно было «видеть его в работе».

Таким образом, хотя новейшее развитие физики как будто не может оказать непосредственной помощи биологам, оно по крайней мере полезно в том отношении, что удалило ошибочные представления, основанные на старых механистических идеях, и расширило круг возможностей, доступных воображению.

Никогда нельзя предсказать пути развития науки заблаговременно, но не так уж неразумно надеяться, что в недалеком будущем в проблемах живой материи возникнет некоторое новое понимание, подобно открытию атома и развитию квантовой теории, способное сразу координировать множество фактов, до того времени казавшихся независимыми и необъяснимыми.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

(список содержит лишь часто повторяющиеся в тексте обозначения)

- c — скорость света.
 - e — электрический заряд, главным образом заряд электрона.
 - E — напряженность электрического поля (в главе 2); энергия.
 - F — сила.
 - g — ускорение силы тяжести.
 - h — постоянная Планка (стр. 175).
 - H — напряженность магнитного поля.
 - i — электрический ток.
 - k — постоянная Больцмана.
 - l — момент количества движения (стр. 224).
 - m — масса; момент относительно данной оси (стр. 224).
 - n — квантовое число (стр. 191).
 - p — импульс.
 - q, Q — электрический заряд.
 - r — расстояние; радиус кривизны.
 - T — абсолютная температура (стр. 124).
 - u, v — скорость.
 - V — потенциальная энергия или электрический потенциал.
 - x — координата.
 - Z — атомный номер (стр. 112).
 - λ — («лямбда») длина волны.
 - ν — («ню») частота.
-

Цена 63 коп.