



В. П. Милантьев

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

и
РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
об АТОМЕ



URSS

В. П. Милантьев

**ИСТОРИЯ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ
И РАЗВИТИЕ
ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
ОБ АТОМЕ**



URSS

МОСКВА

Милантьев Владимир Петрович

История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 248 с.

Учебными планами подготовки физиков в университетах России предусмотрен общий курс «История и методология физики». Содержание данного пособия, посвященного истории возникновения атомных представлений, их развитию и современному состоянию, охватывает часть этого курса. Пособие подготовлено на основе конспекта лекций, которые автор в течение ряда лет читал студентам-физикам в Российском университете дружбы народов, и является дополнительным учебным материалом к курсу автора «Атомная физика».


Пособие предназначено в первую очередь физикам, но может быть полезно специалистам в смежных областях, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами современной физики.

Издательство «Книжный дом «ЛИБРОКОМ»».
117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 9.
Формат 60×90/16. Печ. л. 15,5. Зак. № 2285.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».
117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978–5–397–00146–5

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете:
	http://URSS.ru
	Тел./факс: 7 (499) 135–42–16
URSS	Тел./факс: 7 (499) 135–42–46

6006 ID 75362



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

✦ ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Классические представления об атоме	10
1.1. Возникновение представлений об атоме	10
1.2. Атомная гипотеза в многовековой период гонений	15
1.3. Атомная гипотеза приобретает научную основу	20
1.4. Косвенные подтверждения атомно-молекулярной гипотезы....	24
1.5. Существуют ли атомы?	30
1.6. Как был открыт электрон.....	34
1.7. X-лучи и «лучи Беккереля»	42
1.8. Цветной «портрет» атомов.....	49
1.9. Модели атома	54
1.10. Имеет ли атом планетарное строение?	56
1.11. Как был открыт протон	63
Глава 2. Зарождение квантовых представлений.....	67
2.1. «Ультрафиолетовая катастрофа»	67
2.2. Планк открывает квант действия	72
2.3. Гипотеза световых квантов	82
2.4. Гипотетический квант света становится фотоном.....	90
2.5. Предопределено ли было открытие постоянной Планка?	96
Глава 3. Боровские представления об атоме.....	102
3.1. Нильс Бор «спасает» резерфордский атом	102
3.2. Как были доказаны постулаты Бора.....	107
3.3. Атом Бора	109
3.4. Триумф теории Бора.....	111
3.5. Развитие теории Бора	116
3.6. Пространственное квантование.....	118
3.7. Зеемановское расщепление спектральных линий.....	120

3.8. Опыты Штерна и Герлаха	124
3.9. Тонкая структура спектральных линий и спин электрона	126
3.10. Объяснение Бора периодической системы элементов	130
3.11. Несостоятельность теории Бора.....	132
Глава 4. Создание квантовой механики	135
4.1. «Волны материи».....	135
4.2. Как была доказана гипотеза де Бройля.....	139
4.3. «Физика мальчишек».....	146
4.4. Волновая механика	155
4.5. Волны вероятностей.....	162
4.6. Неопределенность и дополнителность	167
4.7. К чему приводят соотношения неопределенностей?	173
4.8. «Боевое крещение» квантовой механики	177
4.9. Дальнейшее развитие квантовой теории	181
4.10. «Парадоксы» квантовой механики.....	184
Глава 5. Современные представления об атоме.....	187
5.1. Оболочечная модель атома	187
5.2. Диаграммы Гроттриана.....	190
5.3. Эволюция представлений об атоме водорода.....	192
5.4. Многоэлектронные атомы.....	201
5.5. Экзотические атомы	203
5.6. Возбужденные атомы	206
5.7. Стабилизация атомов	207
5.8. «Охлажденные» атомы.....	209
5.9. Трансурановые элементы.....	211
5.10. Мазеры и лазеры.....	214
5.11. Фуллерены.....	221
Литература	224
Приложения	226
П. 1. Э. Резерфорд «Рассеяние α и β частиц веществом и структура атома».....	226
П. 2. Макс Планк «О законе распределения энергии в нормальном спектре»	231
П. 3. Нильс Бор «О строении атомов и молекул».....	236

Чтение хороших книг подобно беседе
с прекрасными людьми прошлых веков.

Рене Декарт

✦ ВВЕДЕНИЕ

История физики является одним из важнейших разделов физики. Ее основная задача состоит не столько в констатации фактов, открытий, гипотез, сколько в анализе эволюции понятий и представлений. Как считал великий физик Альберт Эйнштейн: «... не интересна история фактов, — когда, кто это сделал и т. д., волнует эволюция идей» (по словам Р. Шэнкленда, УФН, 87(4), с. 711, 1965). Вместе с тем идеи и представления высказывались и развивались реальными людьми, гениальными творческими умами в конкретный исторический период существования человеческого общества. Поэтому невозможно отделить эволюцию идей от их творцов с их ошибками и блистательными победами. Факты же сами по себе еще не представляют собой науку. Об этом образно сказал французский физик и математик Анри Пуанкаре: «Наука состоит из фактов, как дом из камней. Но собрание фактов еще не наука, точно так же как куча камней еще не дом». Чтобы понять, как создавалось и развивалось величественное здание современной физики, необходимо изучить эволюцию понятий и представлений от их истоков до современного уровня. В этом духе высказывался известный физик Ван дер Варден, «... полного понимания физической теории можно достичь, лишь следуя историческому методу. Этот метод позволяет нам судить, насколько та или иная гипотеза необходима для объяснения определенного круга явлений, можно ли ее видоизменять и каковы пределы ее применимости» (сб. Теоретическая физика XX века / Под ред. М. Фирца, В. Вайскопфа. М.: ИЛ, 1962, с. 231).

Значительная часть развития физических идей связана с фундаментальной переработкой и переосмыслением основных представлений мыслителей древности. Это: атомистическая гипотеза Демокрита—Эпикура, которая сохраняла свое значение до конца XIX века; воззрения Аристотеля, игравшие большую роль вплоть до середины XVII века, и в борьбе с которыми сформировалась механика; учение Платона о теплороде, которое в разных вариантах использовалось почти до середины XIX века.

Среди различных физических идей особую роль играет атомная гипотеза. Об этом блестяще сказал выдающийся американский физик Ричард Фейнман: *«Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания вдруг оказались бы уничтоженными, и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то, какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — атомная гипотеза (можете называть ее не гипотезой, а фактом — это ничего не меняет): все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому.*

В одной этой фразе содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т. 1, 2. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2007, с. 23).

Настоящая книга посвящена истории развития атомной гипотезы от ее возникновения до современного состояния. Насколько нам известно, книги такого рода пока отсутствуют, хотя в литературе по истории физики и истории квантовой теории, конечно, затрагиваются и вопросы эволюции представлений об атоме.

Физические понятия и представления, сформулированные многими мыслителями — естествоиспытателями, чаще всего опирались на опытные данные, получаемые с помощью непосредственного созерцания и осмысления явлений природы. Но лишь в XVIII веке, когда физика из «философии природы», или естествознания в целом, превратилась в самостоятельную науку, не стало сомнений, что, по словам французского энциклопедиста Дени Дидро, *«экспериментальная физика бесспорно составляет основу наших подлинных знаний»*. Это отмечал великий физик Исаак Ньютон в своих знаменитых «Началах»: *«Свойства тел познаются не иначе, как с помощью экспериментов; следовательно, за общие свойства надо принимать те, которые постоянно обнаруживаются в опытах и которые как не подлежащие уменьшению, устранены быть не могут. Понятно, что в противность ряду опытов не следует измышлять на авось каких-нибудь бреден, не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда проста и всегда сама с собой согласна»*.

Великий английский физик Джеймс Максвелл подчеркивал, что физические понятия и представления возникают на основе эксперимента *«в согласии с числом, мерой и весом»*. В своей лекции в Королевском колледже в Лондоне в 1860 году он говорил: *«Истины, которым мы подчиняемся, лежат высоко за областью туманов и бурь, скрывающей эти истины от непросвещенного ума. Тем не менее, они покоятся на крепком фундаменте мироздания и были утверждены давно в согласии с числом, мерой и весом... Все величины должны быть точными величинами, все законы долж-*

ны быть выражены в терминах точных величин, чтобы всегда существовал эффективный способ обнаружения ошибки и полная гарантия против неясности или неоднозначности...» (УФН, 135(3), с. 371, 1981).

Развитие физики происходило при тесном взаимодействии экспериментальных и теоретических исследований. Как говорил в своей Нобелевской речи американский физик Роберт Милликен, *«Наука идет вперед на двух ногах — теории и эксперимента. Иногда вперед выдвигается одна нога, иногда другая, но неуклонный прогресс достигается лишь тогда, когда обе шагают одинаково»*. Квантовые понятия и представления, составляющие основу физики атома, также возникали под неумолимым напором экспериментальных фактов. Вместе с тем идеи, высказываемые гениальными творцами современной физики, часто опережали эксперимент, и лишь в дальнейшем они получали опытное подтверждение. Эти идеи произвели коренную революцию в физике, и стали основой современной физики, в том числе, физики атомов и молекул. Конечно, гениальные идеи не возникали на пустом месте, — они подготовливались всем ходом развития физики.

Становление и развитие атомной физики происходило при революционном переосмыслении классических понятий и представлений и сопровождалось острыми дискуссиями по проблеме причинности в физике, проблеме измерений и роли наблюдателя, и по проблем человеческого познания вообще. Некоторые итоги этих дискуссий отражены в книге великого датского физика Нильса Бора *«Атомная физика и человеческое познание»* (М.: ИЛ, 1961). Одной из острых является проблема отражения действительности в понятиях и представлениях физики. По этому поводу Эйнштейн писал: *«Реальность не дана нам, а задана (так же, как задают загадки). Это означает, что понять происходящее вне нас можно с помощью построения понятий, достоверность которых целиком основана на их подтверждении. Построенные таким образом понятия точно соответствуют „действительности“, и любой дальнейший вопрос о „природе действительности“ является бессмысленным»*. Подчеркивая особенности квантовых понятий и представлений и основанной на них физической картины мира, выдающийся немецкий физик Макс Планк говорил: *«Построение физической науки происходит на основе измерений и так как каждое измерение связано с чувственным восприятием, то все понятия физики берутся из мира ощущений. Поэтому также каждый физический закон в принципе относится к событиям из мира ощущений... В физике, как и в любой другой науке, царствует не только логика, но и разум. Не все то, что не содержит логических противоречий, также и разумно»* (М. Планк. Избр. соч. с. 569). И далее он развил удивительную диалектическую мысль: *«...Хотя причиной для всякого улучшения и упрощения физической картины мира всегда является новое наблюдение, т. е. процесс в мире ощущений, однако физическая картина мира по своей структуре при этом все более удаляется от мира ощущений ...происходящий одновре-*

менно с дальнейшим усовершенствованием физической картины мира дальнейший ее отход от мира ощущений, означает не что иное, как дальнейшее приближение к реальному миру...» (там же, с. 759).

Понять такие странные на первый взгляд мысли можно, проследив весь путь развития представлений об атоме. Этот путь, полный, по словам Эйнштейна, «*драмы идей*», рассматривается в данной книге.

Более двух тысячелетий атом считался мельчайшей бесструктурной частицей вещества. Лишь великие открытия XIX и XX веков привели к пониманию того, что атом обладает структурой и состоит из электронов и ядра. Затем оказалось, что и ядро является сложным объектом, состоящим из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны получили общее название — *нуклоны*. Дальнейшее развитие физики показало, однако, что простые представления о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов, как из «*последних кирпичиков*», также неверно. Из экспериментов следует, что *нуклоны* имеют сложную структуру, они строятся из *кварков* и взаимно превращаются друг в друга. Согласно современным представлениям «*кирпичиками*» мироздания являются *лептоны* и *кварки*. Лептонами являются, в частности, электроны. Имеют ли лептоны и кварки структуру, покажет будущее развитие физики. Таким образом, атомная физика убедительно подтвердила мысль, которую высказывали многие прозорливые ученые, о бесконечности познания природы. Эту мысль облек в поэтическую форму Валерий Брюсов еще в 1922 году:

*Быть может, эти электроны —
Миры, где пять материков,
Искусства, знания, войны, троны
И память сорока веков!
Еще, быть может, каждый атом —
Вселенная, где сто планет;
Там все, что здесь, в объеме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.*

Квантовые понятия и представления кажутся довольно трудными при первом знакомстве с ними, и противоречащими «*здравому смыслу*», основанному на обыденном опыте. Например, в микромире невозможно одновременно точно определить координату и импульс частицы в некотором направлении; не существуют орбиты — траектории электронов в атоме; все микрочастицы, например электроны, являются тождественными — их нельзя отличить ни по какому признаку — они все абсолютно на одно «*лицо*», и т. д. Чрезвычайно важным было открытие, что законы сохранения энергии, импульса и момента импульса, справедливые для макропроцессов, выполняются и в микромире. Наряду с этим оказалось, что в микромире существуют свои специфические законы сохранения, например, закон сохранения четности и т. д.

Современная квантовая теория разрушила, казалось бы, вполне естественные представления о качественной одинаковости макро- и микро — мира. Вместе с тем она привела к пониманию их единства и взаимообусловленности. Квантовая теория блестяще объясняет не только свойства мира атомов, но и макроскопические эффекты, например, сверхпроводимость и сверхтекучесть. Более того, оказалось, что без квантовых представлений невозможно объяснить и некоторые мегапроцессы, например, свойства нейтронных звезд — пульсаров. Оказалось также, что межзвездное пространство нашей Галактики содержит газ, состоящий из атомов и молекул, и что существуют межзвездные мазеры, и т. п. В последние годы происходит взаимное проникновение физики высоких и сверхвысоких энергий, изучающей явления на расстояниях порядка 10^{-13} – 10^{-16} см, и астрофизики, изучающей свойства макроструктур Вселенной.

Как и всякая физическая теория, квантовая теория и физика атомов имеет многочисленные приложения. Это атомные электростанции и атомные корабли, квантовые генераторы электромагнитного излучения — мазеры, лазеры, квантовые компьютеры и многое другое.

Физика является интереснейшей и увлекательнейшей наукой, приносящей большое удовлетворение тем, кто, преодолевая трудности, чувствует в ней красоту. Как говорил М. В. Ломоносов, *«ничто на земле смертному выше и благороднее быть не может, как упражнение, в котором, красота и важность, отнимая чувство тягостного труда, некоторою сладостию ободряет»*. Современная физика достигла высочайшего развития и совершенства, но не следует думать, что физика как наука полностью построена. Еще великий философ древности Сократ предостерегал: *«Основная ошибка, которой следует остерегаться, — полагать, что мы знаем больше, чем на самом деле»*. Эту же мысль развивал один из основателей квантовой физики Луи де Бройль: *«Величайшей ошибкой, которую, кстати, очень легко сделать, было бы мнение о том, что современные представления науки являются окончательными... Мы никогда не должны забывать (история наук это доказывает), что каждый успех нашего познания ставит больше проблем, чем решает...»*.

Приведем в заключение слова Эйнштейна о науке: *«В своей долгой жизни я познал одну истину, что вся наша наука кажется примитивной и неразвитой, если ее сравнить с реальностью, и все же это самая большая драгоценность, которой мы обладаем»*.

В книге используются многочисленные цитаты из источников, которые указаны в тексте и в списке литературы. Были использованы также материалы из различных сайтов в интернете. В приложении приведены в сокращенном виде классические статьи Эрнеста Резерфорда, Макса Планка и Нильса Бора.

Автор искренне благодарен профессору В. И. Санюку, внимательно прочитавшему рукопись и сделавшему ряд ценных замечаний.

Удивление побуждает людей философствовать. Все люди от природы стремятся к знанию.

Аристотель

ГЛАВА 1 ✦ КЛАССИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АТОМЕ

1.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ АТОМЕ

Слово «атом» в переводе с греческого языка — *ατομος* означает «неразрезаемый» или «неделимый». Атомами древние мыслители более двух с половиной тысяч лет тому назад называли мельчайшие неделимые частички, из которых, по их представлениям, состоит все существующее во Вселенной, в том числе, на Земле. Возникновение учения об атомах связывают с именем древнегреческого философа Демокрита (*Democritus*, около 460–371 гг. до н. э.). Он родился в ионийской колонии Абдера на фракийском берегу Средиземного моря, прожил около ста лет. Говорят, что Демокрит, держа яблоко в руке, рассуждал так: если разрезать яблоко пополам, то будем иметь две его половинки; если затем половину яблока разрезать тоже пополам, то будет четвертая часть яблока; если четвертую часть яблока еще разрезать пополам, то будет восьмая часть яблока и т. д.

Возникает вопрос — можно ли продолжать такое деление яблока до бесконечности, или, в конце концов, мы придем к мельчайшей части, уже далее неделимой и не обладающей свойствами яблока? Демокрит сделал вывод, что предел такого деления существует. Предельную неделиющуюся далее частицу он и назвал атомом. Демокрит говорил: *«Начало Вселенной — атомы и пустота... Атомы бесчисленны по величине и по множеству, носятся же они во Вселенной, кружась в вихре, и таким образом рождается все сложное: огонь, вода, воздух, земля. Дело в том, что последние суть соединения некоторых атомов...»*.

Считают, что идеи атомизма разделял также учитель Демокрита Левкипп (*Leucippus*, V век до н. э.) из Милета. Атомистическое учение Левкиппа—Демокрита в дальнейшем развивал античный мыслитель Эпикур

(*Epicurus*, 341–270 гг. до н. э.) из Самоса и затем его ученики и последователи. К сожалению, их труды и трактаты не сохранились, как и многие другие произведения древности.

Не надо думать, что атомизм Демокрита—Эпикура был результатом лишь абстрактных умозаключений. Напротив, в основе их учения лежат три принципа, опирающиеся на конкретные наблюдаемые факты. Об этом говорится в одном из дошедших до нас сочинений древних мыслителей — это сочинение древнеримского философа и поэта Тита Лукреция Кара (*Lucretius Carus*, 99–55 гг. до н. э.) «О природе вещей» (*De Rerum Natura*). Эта поэма стала известной после того, как ее напечатали в Италии в 1473 году. А отыскал ее в одном из отдаленных монастырей неутомимый собиратель античных рукописей Поджо Браччолини в 1417 году. Наряду с поэмой Лукреция Кара важнейшими первоисточниками физических учений античности являются труды Аристотеля и особенно его произведение «Физика» (*τὰ φυσικά* от существительного *φύσις* — «природа»; это слово в те времена означало «сведения, относящиеся к природе»), а также сочинение Платона «Тимей» (*Timaeus*).

В поэме Лукреция отмечают три принципа, лежащих в основе атомного учения Демокрита—Эпикура: сохранение материи, сохранение форм (или видов) материи и существование пустоты. Первый принцип отражен в словах: «Ничто не способно возникнуть из ничего». Второй принцип связан с тем наблюдаемым фактом, что в природе вновь и вновь повторяются одни и те же виды материи: «На тела основные природа все разлагает и в ничто ничего не приводит». Наконец, «Без пустоты никуда вещам невозможно бы вовсе двигаться было». Это подтверждают факты. Например, «звук идет через стены домов и замкнутые двери, внутрь пролетая», сквозь камни пещер сочится вода и т. д. В воде должны быть пустоты, иначе в ней не могли бы двигаться рыбы, и воздух «...не смог бы сжаться без пустоты и свои все части сплотить воедино...». «...Если б пустот никаких, по каким бы тела проходили, не было, ты бы никаких таких явлений не увидел». Таким образом, «Составляют природу две вещи: это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство. Действовать или подвергаться воздействию тело лишь может, быть же вместе с телом может только пустое пространство».

В атомистическом учении Демокрита—Эпикура считается, что все тела состоят из «изначальных» частиц. Если бы они делились бесконечно, как считал Анаксагор (*Anaxagoras*, 500–428 гг. до н. э.) из Клазомены, то они ничем бы не отличались от Вселенной: «Но хотя нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи из бесконечных частей состоять одинаково будут».



Демокрит

*«Здравый, однако же, смысл отрицает, что этому верить
Может наш ум, и тебе остается признать неизбежно
Существование того, что совсем неделимо, являясь
По существу наименьшим».*

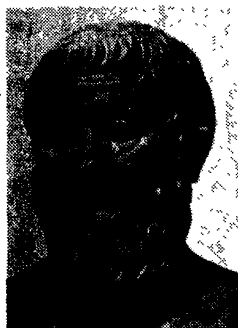
На этом основании делается неизбежный вывод о существовании неделимых «атомов».

Атомистическое учение древнегреческих мыслителей содержало следующие основные положения:

1. Вся материя состоит из атомов, которые являются мельчайшими невидимыми частями материи. Эти атомы не могут быть дальше расщеплены на более мелкие части. Демокрит считал, что процессы разделения материи на мелкие части и соединения их в единое целое являются взаимно обратимыми, а если бы материя могла делиться до бесконечности, то ничто не могло бы остановить этот процесс, который привел бы к разрушению всей материи. Как подчеркивал Эпикур, чрезвычайно важно существование верхнего предела для атомов — они всегда невидимы, по той причине, что вся обозримая человеком материя является делимой и, следовательно, не может быть атомами.
2. Между атомами существует пустое пространство. Поскольку материя состоит из атомов, то все изменения являются результатом движения атомов. Однако движение атомов было бы невозможно, если бы между ними не было пустого пространства.
3. Атомы должны быть совершенно твердыми, иначе они могли бы быть подверженными изменениям из-за внешнего воздействия, и, следовательно, не могли бы быть атомами.
4. Атомы являются однородными, лишенными внутренней структуры. Это фактически есть следствие абсолютной твердости атомов.
5. Атомы различаются по размерам и форме. Это отмечал Аристотель: *«Демокрит и Левкипп говорят, что существуют бесконечно малые тела, бесконечные по численности и по разнообразию их форм...»*. К различию атомов по размеру и форме Эпикур добавил еще различие по их весу.

Таким образом, атомистические представления были построены на основе логического метода, как и в современной науке, вместе с тем эти представления и выводы не имели, и не могли иметь в то время какого-либо количественного обоснования. В учении Демокрита—Эпикура ничего не говорилось также о механизмах притяжения между атомами, и для объяснения сцепления они наделяли атомы какими-то крючками или шероховатостью. Однако они считали, что *«подобное стремится к подобному»*.

Своеобразное атомистическое учение развивал также Платон (Plato, 429–348 гг. до н. э.). Это учение он изложил в своем сочинении «Тимей». По Платону, все тела состоят из некоей первичной материи. Частицы от-



Платон

дельных видов материи (ее структурных состояний — земля, вода, воздух и огонь) отличаются друг от друга только геометрической формой и размерами. Платон считал, что Бог должен был избрать наиболее совершенные в эстетическом отношении фигуры. Такими фигурами, считал Платон, должны быть правильные многоугольники — тетраэдр, октаэдр, икосаэдр, куб и додекаэдр. Он писал: «согласно правильному и наиболее вероятному предположению, то, что имеет форму пирамиды (тетраэдра), является первичной частицей и зерном огня... Все их надо предполагать столь малыми, что каждое отдельное составляющее всех этих видов само по себе не может быть видимо нами, но

множество их становится заметным». Многогранные частицы у Платона вовсе не атомы, а скорее что-то вроде «молекул», своеобразных частиц данного агрегатного состояния. Он никогда не пользовался понятием «атом» и не говорил о делимости своих частиц, утверждая только, что все эти твердые частицы возникают из некоего непрерывного «материнского» субстрата и в нем же растворяются.

Атомистические идеи развивались и древними мыслителями Востока. Известно, что задолго до Демокрита древнеиндийский философ Канабхуш (или Канабхакша) по прозвищу Канада (в переводе — «пожиратель зерен, т. е. атомов») в VII веке до нашей эры создал учение «вайшешика», в котором основным было понятие атома. Принципы этого учения изложены в афоризмах «Вайшешика-сутра». Возможно, что аналогичных взглядов придерживались также китайские мыслители. Однако достоверных сведений об этом не сохранилось.

Но не надо думать, что с атомистическими представлениями были согласны все ученые. Напротив того, великий мыслитель древности Аристотель (Aristotle, 384—322 гг. до н. э.) резко выступил против атомного учения.

Аристотель родился в Стагире, во Фракии (Греция). Учился в академии Платона в Афинах. Платон сразу оценил исключительные способности своего ученика. Он говорил: «Аристотель — душа моей школы».

По приглашению царя Македонии Филиппа Аристотель стал воспитателем его сына — будущего Александра Македонского. В Афинах Аристотель основал философскую школу перипатетиков, которая просуществовала около восьми столетий. Аристотель провел первую систематизацию философских знаний, разделив их на теоретические (математика, физика, метафизика) и практические (этика, полити-



Аристотель

ка, риторика, экономика, поэтика). Сочинения Аристотеля и его идеи, относящиеся ко всем областям знаний того времени, оказали огромное влияние на дальнейшее развитие научной и философской мысли.

После смерти Александра Македонского Аристотеля обвинили в безбожии. Он был вынужден бежать из Афин и вскоре умер.

Аристотель считал, что опыт является единственным источником наших знаний: «Лишь тогда, когда наблюдено достаточное число явлений, можно благодаря этому найти доказательства». Однако он признавал источником познания только прямые ощущения, связанные с простейшим повседневным опытом. Такой опыт показывает, например, что Солнце поднимается над Землей на востоке и опускается на западе, т. е. что Солнце вращается вокруг Земли. Или что легкие предметы (вата, шерсть) падают в воздухе медленнее, чем равные им по объему тяжелые сплошные предметы и т. д. Теперь каждому школьнику известна нелепость этих утверждений. Но со своих позиций Аристотель выступил резко против учения Демокрита—Эпикура, поскольку в этом учении наблюдаемые свойства чувственно ощущаемых предметов истолковывались с помощью корпускул, которые сами недоступны прямому наблюдению. Поэтому он отрицал понятие «неделимых величин» и существование пустоты в природе. По Аристотелю пустота не может существовать потому, что в ней нельзя выделить никакого направления — ни верха, ни низа, ни левого, ни правого, там нет естественного движения и нет причин для его возникновения. Если бы в пустоте возникло движение, то поскольку в ней нет сопротивления, то все тела двигались бы с бесконечной скоростью, а это невозможно. Поскольку пустота пассивна и невозмутима, то ее нет в нашем ограниченном мире. Боязнь пустоты («*horror vacui*») стала основой физики Аристотеля.

Вот как Аристотель в своей книге «Физика» доказывал невозможность существования пустоты:

«Пустоты не существует. Если бы она была, то куда двигалось бы помещенное в нее тело? Ведь, конечно, не во все стороны... В пустоте нет оснований двигаться сюда больше, сюда меньше: поскольку это пустота, в ней нет различий... Далее, никто не сможет сказать, почему тело, приведенное в движение, где-нибудь остановится, ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там? Следовательно, ему необходимо или покоиться, или двигаться до бесконечности. В последнем случае все тела имели бы равную скорость... Из сказанного ясно, что если бы пустота существовала, то и тяжелые, и легкие тела двигались бы в ней одинаково быстро. Но это невозможно. Следовательно, пустоты нет...

Скорость движения одного и того же тела в различных средах различна и обратно пропорциональна степени густоты или плотности среды; таким образом, если предположить, что степень плотности воды равна десятикратной плотности воздуха, то движение в воздухе должно совершаться в десять раз быстрее, чем в воде... Так как

разреженность пустоты бесконечно отличается от плотности пространства, заполненного хотя бы тончайшим веществом, то движущиеся тела должны были бы передвигаться в пустоте мгновенно; но мгновенное движение невозможно; поэтому невозможно и образование пустоты».

Аристотель считал, что основу мира составляет некая первичная материя, и в ней нет ни атомов, ни пустоты. Эта материя может принимать форму какой-либо из четырех стихий — земли, воды, воздуха и огня. Все возможные комбинации этих стихий образуют различные вещества. В противоположность понятию пустоты в атомистическом учении Аристотель ввел пятую стихию — «пятую сущность» (*«quinta essentia»*), которая равноправна с остальными стихиями и является сущностью и основой всех элементов природы. Эту сущность Аристотель называл *эфиром*, которому он приписывал божественные и бессмертные свойства.

Яростные дискуссии по поводу пустоты продолжалась вплоть до эпохи Возрождения. Они несколько утихли после знаменитых опытов Торричелли (*E. Torricelli*, 1608–1647) в 1644 году, доказавших существование *«торричеллиевой пустоты»*. Изобретением ртутного барометра, а также воздушного насоса в 1650 году Отто фон Герике (*Otto von Guericke*, 1602–1686) и другими опытами, в частности, знаменитыми опытами с магдебургскими полушариями был нанесен сокрушительный удар представлениям Аристотеля (и церкви), отрицавшим существование вакуума. Дальнейшее развитие физики показало, однако, что физический вакуум это не пустота, не «вместилище», в котором ничего нет, а вакуум является сложным физическим объектом. Об этом будет говориться дальше, в главе 5.

Так оказалось, что учение Аристотеля стало господствующим и поддержанным церковью, поскольку Аристотель, в частности, считал Землю центром Мироздания, а атомистические идеи Демокрита считались безбожными. Обосновывалось это, например, так: *«Демокрит из Абдеры говорил, что нет конца Вселенной, следовательно, она не могла быть создана какой бы то ни было внешней силой»*. Атомы не признавались католической церковью еще потому, что если все во Вселенной, в том числе Бог, состоит из атомов, то возникает еретический вопрос: кто и когда создал атомы? Поэтому учение Демокрита было отброшено, а сочинения, содержащие атомные идеи и представления, уничтожались.

1.2. АТОМНАЯ ГИПОТЕЗА В МНОГОВЕКОВЫЙ ПЕРИОД ГОНЕНИЙ

Древнегреческий атомизм фактически перестал развиваться уже в III веке до нашей эры благодаря безусловному авторитету Аристотеля, резко выступавшему против атомных представлений Левкиппа—Демокрита—Эпикура. Против идеи об атомах выступали также такие знамени-

тые люди древности, как Марк Тулий Цицерон (*Cicero*, 106–43 до н. э.), Луций Анней Сенека (*Seneca*, около 4 до н. э. – 65 н. э.), Гален (*Galen*, около 130–200 н. э.) и др. Наряду с этим имеются сведения, что не все в то время отрицали существование атомов. Например, Герон Александрийский (*Hero of Alexandria*, около 150 н. э.) использовал атомную идею, чтобы объяснить сжатие и разрежение. Вместе с тем он отрицал существование распространенного вакуума и допускал лишь вакуум между атомами. В Средние века многие церковные иерархи выступали против учения об атомах, вознося идеи Аристотеля до уровня Священного писания. Однако это не привело все-таки к полному забвению атомных представлений. Известно, например, что французский философ и теолог Вильям (*William of Conches*, 1080–1154) открыто говорил об идеях Демокрита, французский священник — энциклопедист Винсент (*Vincent of Beauvais*, 1190–1264) в многотомной энциклопедии в краткой форме писал об атомах. Вместе с тем официальная церковь рассматривала атомизм как опасное и нечестивое учение. Сохранились сведения о том, что в Париже некто Никола́ из Отрекура в 1347 году разъяснял, что в природе нет ничего, кроме движения, соединения и разъединения атомов. Но вскоре он вынужден был отречься от своих взглядов, а его сочинение было публично сожжено. Во времена, когда была найдена и опубликована поэма Лукреция «О природе вещей», идеи об атомах и пустоте считались полнейшей фантазией. И все же атомные идеи не погибли. Такие идеи разделяли Николай Кузанский (*Nicholas of Cusa*, 1401–1464), Джироламо Фракасторо (*Girolamo Fracastoro*, 1478–1553), Джордано Бруно (*Giordano Bruno*, 1548–1600), Галилео Галилей (*Galileo Galilei*, 1564–1642) и другие. Постепенно на протяжении XV–XVII веков возникали попытки объяснять некоторые наблюдаемые в природе процессы наличием невидимых частиц, и в учебнике «Наставления физики», написанном в 1638 году Иоганном Шперлингом (1603–1658) в Виттенбергском университете, говорится: «Учение об атомах не столь ужасно, как это кажется многим. Позорной язвой нашего века является осмеяние, освистывание, осуждение всего, о чем не сразу можно высказать свое мнение..., ничего не стоит сказать, что Эпикур бредил, что Демокрит безумствовал, что древние были дураками. Истина зависит от вещей, а не от человеческих мозжечков».

Значительную роль в популяризации атомистического учения сыграл французский философ и просветитель Пьер Гассенди (*Pierre Gassendi*, 1592–1655), который в 1649 году выпустил книгу «*Syntagma philosophiae Epicuri*». Излагая учение древних греков об атомах, он стремился доказать, что атомизм не имеет отношения к атеизму, и считал, что атомы сотворены Богом и двигаются они не сами по себе, а по воле Бога. И все же выступление с идеями атомизма было рискованным, потому что инквизиция преследовала не только гипотезы, но даже и факты, если они противоречили догматам того времени.



Декарт

Большой вклад в развитие представлений о строении вещества и о механизмах физических процессов внесли знаменитый французский философ, физик и математик Рене Декарт (*René Descartes*, 1596–1650) и английский физик, химик и философ Роберт Бойль (*Robert Boyle*, 1627–1691).

Декарт (латинизированное имя *Картезий*) считал, что материя есть «*телесная субстанция*», которая, как он писал, отличается от «*той первой материи философов, которую они настолько хорошо лишили всех ее форм и качеств, что у нее уже ничего не осталось доступного ясному пониманию*». По Декарту материя в принципе делима до бесконечности и разделена на

разнообразные мельчайшие частицы. Эти частицы — «элементы» — являются реальными элементарными частицами, состоящими из одного и того же первичного вещества, но отличающимися друг от друга формой и размерами. Он считал, что существуют элементы трех видов — элементы огня, воздуха и земли. Эти частицы находятся в постоянном бесконечном движении. Поэтому все в мире постоянно изменяется. При этом все движения, происходящие в мире, сводятся исключительно к механическим перемещениям. Декарт считал, что механические законы применимы ко всей природе, и предлагал гипотетические, порою фантастические, но зато наглядные объяснения многих явлений, следуя своему принципу, что понятие какое либо явление природы — это значит наглядно его себе представить. И он давал волю своему воображению. По этому поводу голландский физик Христиан Гюйгенс (*Ch. Huygens*, 1629–1695) с иронией говорил: «*Господин Декарт нашел способ придавать своим догадкам и вымыслам видимость истины. С теми, кто читал его „Начала философии“, происходило нечто подобное тому, что бывает с читающими романы, которые нравятся и производят то же впечатление, что и правдивые истории.*»

Роберт Бойль исходил из того, что «*при первоначальном образовании смешанных тел универсальная материя, из которой они состояли, содержащаяся в различных частях Вселенной, была действительно разделена на маленькие, различно движущиеся частицы разных размеров и форм...*». Такого рода частицы, считал Бойль, «*делимы мысленно и всемогуществом Бога, но в силу их малости и прочности природы в действительности вряд ли когда разделяются, и в этом смысле они могут быть названы наименьшими и первичными природными вещами*». Как и Декарт, он полагал,

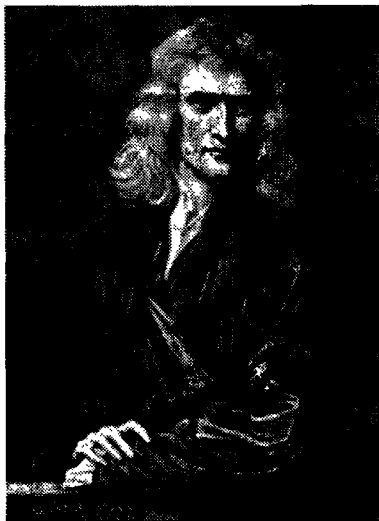


Бойль

что эти частицы подчиняются известным в то время законам механики, поскольку опытные факты говорят о том, что *«нет необходимости ожидать изменения физических законов с изменением линейных размеров объекта»*.

Атомную гипотезу разделял и великий физик Исаак Ньютон (*Isaak Newton, 1643–1727*).

Ньютон родился в Вулсторпе (в 150 км от Лондона) в семье зажиточного фермера. В 1665 году он окончил Кембриджский университет. В 1669 году его учитель Барроу (*I. Barrow, 1630–1677*) передал ему кафедру, считая, что ученик уже превзошел учителя. С 1695 года Ньютон в Лондоне был сначала смотрителем, а затем директором монетного двора. В 1705 году за научные заслуги ему присвоили дворянское звание, после чего его стали называть *«сэр Исаак Ньютон»*. Он сформулировал основные законы классической механики, открыл закон всемирного тяготения, дисперсию света, развил корпускулярную теорию света, независимо от немецкого ученого и философа Готфрида Лейбница (*G. Leibniz, 1646–1716*) открыл дифференциальное и интегральное исчисление. На основе представлений об абсолютном пространстве и времени он создал первую физическую картину мира. Ньютон является признанным гением человечества. Как говорил Эйнштейн, *«Ньютон был первым, кто попытался сформулировать элементарные законы, которые определяют временной ход широкого класса процессов в природе с высокой степенью полноты и точности...»* и *«... оказал своими трудами глубокое и сильное влияние на все мировоззрение в целом»*.



Ньютон

В своих трудах Ньютон не раз ссылаясь «на авторитет греческих и финикийских философов, которые приняли васиит и атомы, и тяготение атомов, как первые принципы своей философии... Однако об атомах, как неделимых хотя бы в эпикурейском смысле, Ньютон никогда не говорит, предпочитая неопределенное и широкое понятие частиц или корпускул. Знаменитый физико-химический 31-й вопрос „Оптики“ целиком касается взаимодействий атомов и молекул, если говорить на современном языке, но в нем термин „атомы“ также не упоминается. Ньютон при этом не удовлетворяется общими представлениями и стремится уточнить представление о частицах, составляющих тела...

Важнейшим нововведением в ньютоновском учении о веществе было, однако, вполне отчетливое представление о сложности частиц, составляющих тела. В этом, может быть, и находится причина, по которой Ньютон избегал говорить о неделимых атомах». Так говорил об атомизме Ньютона выдающийся российский ученый С. И. Вавилов (1891–1951) (В Сб. статей к трехсотлетию со дня рождения Исаака Ньютона. М.: АН СССР, 1943, с. 49).

Свои представления об атомах Ньютон изложил в третьем томе «Оптики»: «Мне кажется вероятным, что Бог вначале создал материю в виде сплошных, массивных, твердых, непроницаемых, движущихся частиц таких размеров и форм и с такими другими свойствами и в таких пропорциях к пространству, которые наилучшим образом служат той цели, для которой Он их создал, и что эти простейшие частицы, будучи твердыми, несравненно прочнее, чем любые другие тела, составленные из них...». Ньютон впервые высказал предположение о сложном строении частиц тела. Он писал: «Вообразим себе, что эти частицы тел расположены так, что промежутки, или пустые пространства между ними, равны им всем по величине, что эти частицы могут быть составлены из других частиц, более мелких, пустое пространство между коими равно величине всех этих меньших частиц, и что подобным же образом эти более мелкие частицы снова составлены из еще более мелких, которые все вместе по величине равны всем порам или пустым пространствам между ними... Если есть пять таких степеней в теле, будет в тридцать один раз более пор, чем твердых частей. При шести степенях в теле будет в шестьдесят три раза пор, чем твердых частей. И так далее до бесконечности. Есть и другие пути для понимания пористости тел. Но каково в действительности их внутреннее строение, мы еще не знаем». Эту примерную картину сложного строения частиц Ньютон пояснил с помощью сил взаимодействия: «Мельчайшие частицы материи могут сцепляться посредством сильнейших притяжений, составляя большие частицы, но более слабые; многие из них могут также сцепляться и составлять еще большие частицы с еще более слабой силой, и так в ряде последовательностей, пока прогрессия не закончится самыми большими частицами, от

которых зависят химические действия и цвета природных тел». Таким образом, по Ньютону химические и оптические свойства вещества определяются сложными частицами, а не элементарными корпускулами. Можно только изумляться тому, как Ньютон, предвзяв трехвековое развитие физики и химии, интуитивно предугадывал сложное строение атомов. Вместе с тем Ньютон, следуя своему принципу «гипотез не измышляю» (*hypotheses non fingo*), не считал свои предположения о микроскопическом строении вещества за твердо установленные научные факты. Атомистические представления Ньютона принципиально отличались от других тем, что он предполагал возможность существования не только механических, но и других видов взаимодействий между частицами: «...Притяжение тяготения, магнетизма и электричества простираются на весьма заметные расстояния и, таким образом, наблюдались просто глазами, но могут существовать и другие притяжения, простирающиеся на столь малые расстояния, которые до сих пор ускользают от наблюдения, и, может быть, электрическое притяжение распространяется на такие малые расстояния и без возбуждения трением».

1.3. АТОМНАЯ ГИПОТЕЗА ПРИОБРЕТАЕТ НАУЧНУЮ ОСНОВУ

У древних мыслителей и их последователей атомы существовали умозрительно лишь как результат простых наблюдений и размышлений, т. е. атомы воспринимались как «любопытная гипотеза, допустимая с точки зрения нашей познавательной способности». Никто их не видел и не мог видеть. Как говорил Канада, «о существовании атомов мы узнаем не восприятием, а рассуждением». Но атомная гипотеза оказалась очень плодотворной, когда началось количественное изучение химических превращений. На основе этой гипотезы английский химик и физик Дальтон (*John Dalton*, 1766–1844) в 1802–1804 годах сформулировал понятия о химическом элементе и атомном весе и составил первую таблицу атомных весов элементов. Дальтона называют *Отцом химической атомной теории*.



Дальтон

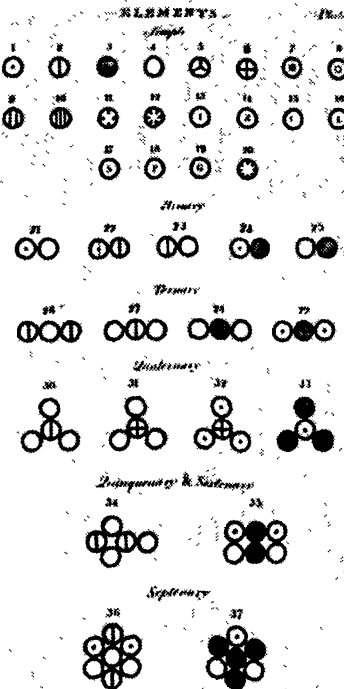
Ради справедливости следует сказать, что еще в 1661 году Роберт Бойль в своем труде «Химик-скептик» впервые ввел понятие химического элемента как простейшей составной части тела. Он писал: «Я понимаю под элементами... некоторые примитивные и простые или совершенно несмешанные тела, которые, не будучи образованы из других тел или друг из друга, являются ингредиентами, из которых непосредственно состоят тела, называемые совершенно смешанными, и на которые они в конечном итоге разлагаются».

Основные идеи Дальтона заключаются в следующем:

- 1) химические элементы состоят из атомов, представляющих собой чрезвычайно мелкие, дискретные, неделимые и неразрушаемые частицы. Они сохраняют свои свойства при всех химических и физических изменениях. В этом Дальтон является последователем учения Демокрита. По Дальтону, *элемент* — это химическое вещество, которое не может быть дальше разложено химическими средствами, такими, как нагревание, химические реакции и т. п. Атомы данного элемента не могут изменяться в химических реакциях с атомами других элементов. Например, атомы кислорода и водорода остаются самими собой, как бы они ни соединялись;
- 2) атомы данного элемента имеют одинаковые свойства, в том числе, одинаковые массы. После открытия изотопов стало ясно, что на самом деле это неверно, но во времена Дальтона это положение играло важную роль;
- 3) атомы разных элементов имеют разные массы. Это положение также находилось в русле учения древнегреческих мыслителей. Однако в отличие от них Дальтон не просто сформулировал положение, но разработал эффективный метод определения в числах относительных весов атомов на основе имеющихся химических данных. Вскоре было выяснено, что элементов (и атомов) не бесконечно много, как представлял себе Демокрит, а вполне счетное количество. Во времена Дальтона было известно около 40 элементов, а теперь — свыше 109. Таким образом, огромное количество различных веществ в природе составлено из сравнительно небольшого набора атомов;
- 4) атомы комбинируются в малых целочисленных пропорциях, например, 1:1, 1:2, 2:3 и т. д.

Дальтон впервые ввел числа в представление об атомах, что дало возможность получить из атомной гипотезы наблюдаемые следствия. Так из абстрактного философского понятия атом становился реальным объектом научного исследования. Были сформулированы два фундаментальных химических закона — *закон постоянства состава* и *закон простых кратных отношений* (Праут, 1799 г.; Дальтон, 1808 г.). Было также установлено великим русским ученым М. В. Ломоносовым (1711–1765) в 1756 году и французским химиком Антуаном Лавуазье (*A. Lavoisier*, 1743–1794) в 1774 году, что в химических реакциях должен выполняться *закон сохранения массы вещества*. Было замечено, что весовые количества химических элементов, вступающих в реакцию и образующих химические соединения, находятся во вполне определенных отношениях. Например, оказалось, что вода образуется в результате реакции при отношении весовых количеств водорода и кислорода 1:8, т. е. соединение 1 г водорода с 8 г кислорода образует 9 г воды. В случае газов простые закономерности наблюдаются не только для масс реагирующих веществ, но и для их объе-

мов. В 1808 году французский химик и физик Жозеф Гей-Люссак (*J. Gay-Lussac*, 1778—1850) впервые обнаружил, что два объема газообразного водорода, соединяясь с одним объемом кислорода, образуют два объема паробразной воды. Однако Дальтон не придал этому значения. Он принимал для воды формулу HO , т. е. считал, что один атом кислорода соединяется с одним атомом водорода. Но затем шведский химик Йенс Якоб Берцелиус (*J. Berzelius*, 1779—1848) доказал, что на самом деле один атом кислорода соединяется с двумя атомами водорода. Таким образом, если, например, в 16 граммах кислорода содержится N атомов, то в 2 граммах водорода должно быть $2N$ атомов. Это значит, что один атом кислорода в 16 раз тяжелее атома водорода. Так стало возможным сравнивать между собой атомы различных элементов. Была введена количественная величина — *атомный вес* (теперь пользуются другой величиной, которая называется — *атомная масса*). Свои выводы, основанные на атомной гипотезе, Дальтон опубликовал в 1808 году в книге «*Новая система химической философии*». Из приведенного фрагмента этой книги можно видеть обозначения химических элементов, введенных Дальтоном, и приписанные им атомные веса. Книга Дальтона послужила мощным толчком для дальнейшего развития науки.



EXPLANATION OF THE PLATES. 219

PLATE IV. This plate contains the arbitrary marks or signs chosen to represent the several chemical elements or ultimate particles.

Fig.	Element	Weight
1	Hydrog.	its rel. weight
2	Azote	5.12
3	Carbonic or charcoal	5.15
4	Oxygen	7.94
5	Phosphoric	9.15
6	Sulphur	13.16
7	Magnesia	20.17
8	Lime	27.18
9	Soda	36.19
10	Potash	42.20
21	An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight 22	
22	An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen	
23	An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen	
24	An atom of carbonic gas, composed of 1 of carbonic and 1 of hydrogen	
25	An atom of carbonic oxide, composed of 1 of carbonic and 1 of oxygen	
26	An atom of nitrous oxide, 2 azote + 1 oxygen	
27	An atom of nitric acid, 1 azote + 2 oxygen	
28	An atom of carbonic acid, 1 carbonic + 2 oxygen	
29	An atom of carbonated hydrogen, 1 carbonic + 2 hydrogen	
30	An atom of sulphuric acid, 1 azote + 2 oxygen	
31	An atom of sulphuric acid, 1 sulphur + 2 oxygen	
32	An atom of sulphurated hydrogen, 1 sulphur + 2 hydrogen	
33	An atom of steech, 1 carbonic + 1 hydrogen	
34	An atom of nitrous acid, 1 nitric acid + 1 nitrous gas	
35	An atom of acetous acid, 2 carbonic + 2 water	
36	An atom of nitric acid, 1 nitric acid + 1 ammonia + 1 water	
37	An atom of sugar, 1 alcohol + 1 carbonic acid	

Фрагмент книги Дальтона

В 1814 году «король химиков» Берцелиус, изучив огромное количество веществ, опубликовал таблицу атомных весов 41 химического элемента и ввел обозначения — химическую символику элементов, которые используются и в настоящее время.

Вместе с тем во времена Дальтона не все признавали атомную гипотезу, например, известный французский химик Клод Луи Бертолле (С. L. Berthollet, 1748–1822) категорически отвергал идею атома. Характерно высказывание французского химика Сент-Клэр Девиль: «Я не допускаю ни закона Авогадро, ни атома, ни молекулы, ибо я отказываюсь верить в то, что я не могу ни видеть, ни вообразить». Французский химик Пьер Эжен Бертелло (P. E. Berthelot, 1827–1907) также считал понятие молекулы неопределенным, а понятие атома чисто гипотетическим. Французский химик Жан Батист Дюма (Dumas, 1800–1884) выразался еще резче: «Если бы это зависело от меня, то я бы искоренил в науке слово атом, потому что я убежден, что оно выходит за пределы проверяемого опытом, а химия никогда не должна выходить за границы проверяемого экспериментом».

И все же атомно-молекулярные представления продолжали развиваться, поскольку результаты, полученные на основе этих представлений, подтверждались в экспериментах. Методы определения атомных и молекулярных весов в химии основываются, как правило, на законе итальянского физика Амадео Авогадро (Amadeo Avogadro, 1776–1856), который был открыт в 1811 году. Этот закон гласит так: в равных объемах различных газов при одинаковых давлениях и температурах содержится одинаковое число молекул. Известно, например, что 2 грамма молекулярного водорода занимают объем 22,4 л.

Допустим, что число молекул в этом объеме равно N_A . Столько же и молекул кислорода в этом объеме, но масса молекул кислорода равна 32 граммам. Отсюда опять же следует, что атом кислорода по массе в 16 раз больше атома водорода. Таким образом, измеряя плотность какого-нибудь газа и сравнивая ее с плотностью водорода, можно сразу определить атомную массу этого газа, т. е. величину, которая недоступна непосредственному восприятию.

Число молекул, которые находятся в 22,4 л (объем одного моля) любого газа при температуре 0°C и нормальном давлении, называют *постоянной Авогадро* $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ частиц/моль.

Следуя Дальтону, многие химики того времени широко пользовались представлениями об атомах и молекулах. Вместе с тем четкого различия между этими представлениями еще не было. Вводились такие термины, как «сложные атомы», «элемен-



Авогадро

тарные молекулы». В 1860 году на Международном химическом конгрессе, проходившем в немецком городе Карлсруэ, путем голосования было принято решение о различии понятий «атом» и «молекула». Этим был положен конец существовавшей тогда неразберихи с терминологией.

1.4. КОСВЕННЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОЙ ГИПОТЕЗЫ

Атомно-молекулярную гипотезу успешно развивали не только химики. Еще в 1620 году крупный политический деятель Англии и философ Фрэнсис Бэкон (*F. Bacon*, 1561–1626) в трактате «Новый органон» впервые высказал идею, что тепло есть движение, при этом он считал, что *«самое лучшее из всех доказательств есть опыт, если только он коренится в эксперименте»*. Разделяя подобные взгляды, Бойль в 1675 году продемонстрировал превращение упорядоченного движения в неупорядоченное, тепловое.

В дальнейшем кинетические воззрения на теплоту развивали Роберт Гук (*R. Hooke*, 1635–1703), Иоганн и Даниил Бернулли и др. Даниил Бернулли (*Daniel Bernoulli*, 1700–1782) в 1738 году в работе «Гидродинамика» рассматривал газ как совокупность мельчайших частиц, с движением которых связана теплота, а давление газа на стенки он считал результатом совокупного действия этих частиц. Аналогичные мысли высказывал М. В. Ломоносов. Он считал, что в природе существует два вида *«нечувствительных частиц»* материи: это *«элементы»*, т. е. атомы, и *«корпускулы»*, т. е. молекулы. Он полагал, что *«элемент есть часть тела, не состоящая из каких-либо других меньших и отличных между собой тел»*, а *«корпускула есть собрание элементов в одну небольшую массу»*.



Ломоносов

В своей диссертации «Размышления о причине тепла и холода» в 1744 году Ломоносов видел причину тепла и холода «во взаимном движении нечувствительных физических частичек». Он рассматривал три возможных вида движений частиц: поступательное, колебательное и вращательное, и пришел к выводу, что ни поступательное, ни колебательное движения не могут объяснить теплоты и что «причина теплоты состоит во внутреннем вращательном движении», при этом «частички горячих тел должны вращаться быстрее, более холодные — медленнее». Он же сформулировал в 1748 году положение, что материя и движение не уничтожимы и не сотворимы. В своем труде «Рассуждение о твердости и жидкости тел» Ломоносов писал: «Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что, сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте. Сколько часов положит кто на бдение, столько же сну отнимет. Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силой другое, столько же оные у себя теряет сколько сообщает другому, которое от него движение получает».

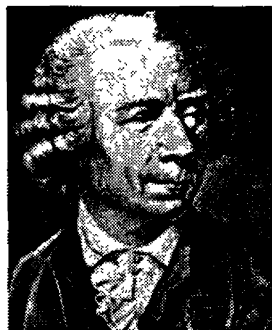
Представления о том, что теплота связана с движением мельчайших частиц вещества, были распространены в ученом мире в XVII веке и первой половине XVIII века. Так знаменитый петербургский ученый Леонард Эйлер (L. Euler, 1707–1783) писал в 1752 году:

«То, что теплота заключается в некотором движении малых частиц тела, теперь уже достаточно ясно».

Но во второй половине XVIII века вновь стала преобладать материальная, или субстанциальная теория теплоты. Эта теория, основателем которой считается Платон, постулировала существование флюида специального рода — *теплорода*, ответственного за тепловые явления. Теплород считался невесомым, рассеянным по всей материи, способным проникать в тела, «сочетаться» с ними и превращать твердые тела в жидкость, а жидкость переводить в газообразное состояние. Сторонники флюидной теории приводили образное пояснение, говоря, что теплород содержится в веществе, например, в газе, как сок в апельсине. Сожмешь апельсин — потечет сок. Так же при сжатии газа из него выделяется теплород, что приводит к нагреву газа. Представления о теплороде изображались также в виде своеобразных формул:

Лед + Теплород = Вода; Вода + Теплород = Пар.

И все же механические представления о теплоте не исчезли даже во второй половине XVIII века, хотя они и носили в основном качественный характер. Например, в 1798 году в Мюн-



Эйлер

хене Бенджамин Румфорд (Томпсон) (*B. Rumford*, 1753–1814) рассверливал тупым сверлом орудийный ствол, помещенный в воду, и через 2,5 часа работы сверла вода закипала. В связи с этим Румфорд писал: *«Трудно было бы описать удивление и изумление, выраженное зрителями, при виде, как столь большое количество воды нагревалось, и даже было доведено до кипения без всякого огня»*. Анализируя подобные опыты, Румфорд пришел к выводу, что теплота является особым видом движения — движением частиц вещества.

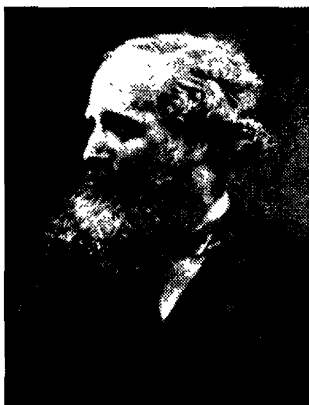
В 1783 году Лавуазье и Лаплас в «Мемуаре о теплоте» рассмотрели обе конкурирующие теории теплоты. Они впервые отметили, что основу кинетической теории теплоты составляет «принцип сохранения живых сил». (Под живой силой в то время понимали произведение массы частицы на квадрат ее скорости). Они писали: *«В той гипотезе, которую мы рассматриваем, теплота есть живая сила, происходящая от незаметных движений молекул тела; она есть сумма произведений массы каждой молекулы на квадрат ее скорости»*. Вместе с тем, они не сделали вывода о том, какая из этих теорий предпочтительна.

Важным событием в развитии представлений о теплоте стало открытие закона о взаимной превращаемости механической работы и тепла, который впервые был сформулирован немецким врачом Майером (*J. R. Mayer*, 1814–1878) в 1840–1842 годах. В 1843 году английский физик Джеймс Джоуль (*J. Joule*, 1818–1889) на основе проведенных им экспериментов определил механический эквивалент теплоты. Он писал: *«Количество тепла, способное увеличить температуру одного фунта воды на один градус Фаренгейта, равно и может быть превращено в механическую силу (энергию), которая в состоянии поднять 838 фунтов на высоту в 1 фут»*. Этим Джоуль дал опытное доказательство закона сохранения и превращения энергии. Затем независимо в 1847 году немецкий естествоиспытатель Герман Гельмгольц (*G. L. F. Helmholtz*, 1821–1894) сформулировал и математически обосновал этот закон. После этого стало ясно, что теплота как-то связана с движением мельчайших частиц вещества. Поэтому вновь начал возникать интерес к молекулярно-кинетическим представлениям. В 1848–1851 годах Джоуль старался доказать, так же как и Ломоносов, что вращательное движение атомов *«...способно объяснить закон Бойля—Мариотта, а также другие явления, представляемые упругими жидкостями»*. Однако вскоре он вместо вращательного движения атомов стал рассматривать их поступательное движение и оценил скорость молекул газа. Оказалось, что эта скорость очень большая. По его оценкам молекулы водорода при комнатной температуре движутся со скоростью около 1800 м/с, т. е. вдвое быстрее артиллерийского снаряда. В 1847 году английский физик Джон Герапат (*J. Herapath*, 1790–1868) в книге «Математическая физика» изложил свою кинетическую теорию, построенную на модели идеального газа. На основе этой модели он объяснил газовые

законы, диффузию, распространение звука в газах. В 1856 году немецкий физик Август Крёниг (*A. Krönig*, 1822–1879) в статье «Основания теории газов» рассматривал газ как совокупность упругих шариков, совершающих хаотическое движение, и высказал идею о применении вероятностных методов для описания газов. Он писал: *«Путь каждой молекулы настолько неупорядочен, что вычислить его не представляется возможным. Однако, привлекая законы теории вероятностей, можно, тем не менее, вместо полного беспорядка получить полный порядок»*. Он впервые показал, что *«живая сила атомов есть ничто иное, как отсчитанная от абсолютного нуля температура»*, и доказал закон Авогадро. Аналогичные воззрения развивал немецкий физик Рудольф Клаузиус (*R. Clausius*, 1822–1888), который писал: *«В новейшее время пробило себе дорогу воззрение, что теплота есть движение. Теплота, содержащаяся в телах и обуславливающая их температуру, рассматривается при этом как движение восточных атомов...»*. В 1859 году он ввел понятия средней длины свободного пробега молекул в газе и о сфере действия молекул. Он впервые вычислил величину давления газа на стенки сосуда и обосновал уравнение Клапейрона (*B. Clapeyron*, 1799–1864).

Дальнейший крупный шаг в развитии молекулярно-кинетической теории связан с именем Джеймса Клерка Максвелла (*James Clerk Maxwell*, 1831–1879).

Максвелл учился в Эдинбургском и Кембриджском университетах. Он является одним из основателей кинетической теории газов. В 1859 году он впервые вывел закон распределения молекул по скоростям, носящий его имя. Максвелл уточнил математические формулировки длины свободного пробега и других величин, характеризующих тепловое движение. Он развил теорию явлений переноса, ввел понятие времени релаксации. В 1867 году он разъяснил статистическую природу второго начала термодинамики



Максвелл

(«демон Максвелла»), в 1878 году ввел термин «статистическая механика». Выдающимся достижением Максвелла стали сформулированные им уравнения электродинамики на основе обобщения опытных данных. Он создал знаменитую Кавендишскую лабораторию.

Максвелл считал себя последователем Демокрита, Эпикура, Лукреция. Он не только не сомневался в существовании атомов, но и задумывался об их структуре: «... Мельчайшее твердое тело, которое воображал Лукреций и принял Ньютон, было изобретено с явной целью объяснить постоянство свойств тел. Но это предположение отказывается служить, если мы захотим дать себе отчет в колебаниях молекулы, которые обнаруживает спектроскоп. В самом деле, мы можем предположить, что атом — это тело упругое, но это значило бы наградить его тем самым свойством, для объяснения которого как свойства сложных тел и было первоначально допущено атомное строение тел...».

В работе 1860 года «Пояснения к динамической теории газов» Максвелл, исходя из модели газа, состоящего из «неограниченного числа маленьких, твердых и совершенно упругих сфер, действующих друг на друга только во время столкновения». Он считал свою модель математической аналогией реальности: «Вместо того чтобы говорить, что все частицы тверды, шарообразны и упруги, можно, если угодно, сказать, что эти частицы являются центрами силы, действие которой ощущимо лишь на некотором малом расстоянии, где она проявляется внезапно в виде очень интенсивной силы отталкивания». Максвелл особо отмечал важность атомной гипотезы: «Из гипотезы, согласно которой мельчайшие части материи находятся в быстром движении, причем скорость этого движения возрастает с температурой, может быть выведено так много свойств материи, особенно если взять ее в газообразной форме, — что истинная природа этого движения является предметом естественного интереса».

В 1865 году австрийский физик Лошмидт (*Josef Loschmidt*, 1821–1895) оценил размеры молекул газа. Он использовал опытные данные о коэффициенте трения в газообразном воздухе и сопоставил их с подобными данными в жидком воздухе, в котором, как он предположил, молекулы непосредственно соприкасаются друг с другом. По его расчетам «диаметр» молекул воздуха оказался равным $12 \cdot 10^{-8}$ см, при этом масса атома водорода составила 10^{-24} грамма. Он вычислил также число молекул в 1 см^3 при нормальных условиях. Это число в 1909 году французский физик Жан Перрен (*J. B. Perrin*, 1870–1942) предложил называть постоянной Лошмидта: $N_L = 2,68676 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. «Диаметр и масса молекул, полученные на основании этих методов, — писал Максвелл, — оказались вообще весьма малы, но никоим образом, не бесконечно малы. Около двух миллионов молекул водорода, положенных в ряд, заняли бы миллиметр, и около 200 миллионов миллионов миллионов их весили бы один миллиграмм. Числа эти

нужно рассматривать как весьма грубые приближения; они по мере усовершенствования науки будут исправлены более разнообразными и точными опытами, но основной результат, который, по-видимому, установлен, есть то, что определение массы молекулы — законный объект научного исследования, и что эта масса никоим образом не есть величина неизмеримо малая».

Продолжил развитие молекулярно-кинетической теории выдающийся немецкий физик Людвиг Больцман (*Ludwig Edvard Boltzmann*, 1844–1906).

Людвиг Больцман является одним из основателей молекулярно-кинетической теории газов: он разработал статистику, названную его именем, в 1872 году впервые вывел кинетическое уравнение, лежащее в основе физической кинетики, сформулировал знаменитую H-теорему, которая с данной им статистической интерпретацией второго начала термодинамики служит основой теории необратимых процессов, связал энтропию физической системы с вероятностью ее состояния, теоретически обосновал один из законов теплового излучения (закон Стефана—Больцмана) и т. д.

Молекулярно-кинетическая теория смогла объяснить все газовые законы, явления переноса и т. д. И все равно атомные представления о строении вещества оставались лишь гипотезой, которая воспринималась не всеми учеными. Так известный философ Артур Шопенгауэр (*A. Schopenhauer*, 1788–1860) считал атомы «выдумкой невежественных аптекарей», австрийский физик и философ Эрнст Мах (*E. Mach*, 1838–1916) отрицал кинетическую теорию, реальность атомов и молекул и называл последователей атомистики «общиной верующих», немецкий физик и химик Вильгельм Оствальд (*W. Ostwald*, 1853–1932) был уверен, что «атомы будут существовать только в пыли библиотек». Эти идеи пытались внедрить и в сознание студентов. Так известный шотландский физик



Больцман

Тэйт (*P. Tait*, 1831–1901) в учебнике по физике в 1885 году писал: *«Твердый атом... живет в виде невероятной, но все еще не опровергнутой гипотезы и поднесь... Однако несравненно правдоподобнее теория, по которой материя непрерывна, то есть не состоит из частиц с промежутками».*

В ответ на доказательства сторонников атомистики их противники утверждали, что атомная гипотеза «является примитивной тенденцией видеть за всеми физическими явлениями механическую модель» и язвительно замечали: «А вы хоть один атом видели?»

Особенно остро переживал нападки на атомные представления Больцман. *«Я последний, кто отрицает возможность построения любой иной картины мира, кроме атомической,»* — говорил он с горечью. Постоянные нападки на Больцмана и травля его со стороны противников кинетической теории вызвали у него манию преследования. Возможно, что именно это привело его к личной трагедии — он покончил с собой.

1.5. СУЩЕСТВУЮТ ЛИ АТОМЫ?

Большинство физиков XIX века не сомневалось в существовании атомов. Например, выдающийся английский физик-экспериментатор Майкл Фарадей (*M. Faraday*, 1791–1867) в 1834 году писал: *«Мы ничего не знаем, что такое атом, но мы невольно представляем себе какую-то малую частичку, которая является нашему уму, когда мы о ней думаем».* Собственно результаты атомно-молекулярной теории, согласующиеся с опытными фактами, уже являются косвенным подтверждением атомной гипотезы. И все-таки нужны были опыты, непосредственно подтверждающие реальность атомов. Одним их первых был опыт, выполненный в 1827 году шотландским ботаником Робертом Броуном (*R. Brown*, 1773–1858). Он обнаружил, что мельчайшая пыльца растений скачкообразно движется в воде под действием какой-то силы. Долгие годы не удавалось объяснить это явление. Лишь в конце XIX века стали думать, что видимые в микроскоп беспорядочные движения пылцы растений вызваны не ими самими или внешними по отношению к жидкости причинами, а внутренними движениями, присущими жидкости, т. е. что броуновское движение обусловлено столкновениями молекул жидкости с взвешенными в ней частицами. Эти представления Дельсоль и Карбонель в 1877 году сформулировали следующим образом: *«При большой площади удары молекул, являющиеся причиной давления, не вызывают никакого сотрясения подвешенного тела, потому что они в совокупности создают равномерное давление на тело во всех направлениях. Но если площадь недостаточна, чтобы скомпенсировать неравномерность, нужно учесть неравенство давлений и их непрерывность от точки к точке. Закон больших чисел не сводит теперь эффект соударений к среднему равномерному давлению, их равнодействующая уже не будет равна нулю, а будет непрерывно изменять свое на-*

правление и свою величину». Другими словами, предполагалось, что броуновское движение вызывается неуравновешенностью ударов молекул жидкости о поверхность взвешенной частицы. Это удалось убедительно доказать на опыте лишь в 1908–1909 годах французскому физику Жану Перрену (*Jean Baptiste Jean Perrin*, 1870–1942). К тому времени Альберт Эйнштейн (*Albert Einstein*, 1879–1955) и Мариан Смолуховский (*Marian Smoluchowski*, 1872–1917) построили теорию броуновского движения. Теория Эйнштейна была опубликована в 1905 году в статье под названием «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» (*Ann. Phys.*, 17, 549, 1905; русский перевод: — Эйнштейн А. Собрание научных трудов, М.: Наука, 1966, т. 3, с. 108). Эйнштейн писал: «В этой работе должно быть показано, что, согласно молекулярно-кинетической теории теплоты, взвешенные в жидкости тела микроскопических размеров вследствие молекулярного теплового движения должны совершать такие движения, которые легко могут быть обнаружены под микроскопом. Возможно, что рассматриваемые здесь движения тождественны с так называемым „молекулярным броуновским движением“; однако доступные мне данные относительно последнего настолько неточны, что я не мог составить себе об этом определенного мнения. Если рассматриваемое здесь движение вместе с ожидаемыми закономерностями действительно будет наблюдаться, то классическая термодинамика уже для микроскопически различных областей не может считаться вполне действительной, и тогда возможно точное определение истинных атомных размеров. Если же, наоборот, предсказание этого движения не выполнится, то это будет веским аргументом против молекулярно-кинетического представления о теплоте». Таким образом, Эйнштейн придавал своей теории и следствиям из нее важное принципиальное значение. Он и Смолуховский справедливо считали, что не нужно рассматривать истинный путь, проходимый броуновской частицей. Этот путь на опыте определить невозможно, потому что частица очень быстро меняет свою скорость — примерно 10^{18} раз в секунду. Поэтому надо рассматривать среднее смещение центра массы частицы за определенный промежуток времени. Расчеты Эйнштейна показали, что среднее смещение броуновской частицы L за время t определяется формулой $L = \sqrt{2Dt}$, где D — коэффициент диффузии. Объясняя пропорциональность среднего смещения корню квадратному из времени, Эйнштейн писал: «Это происходит оттого, что два пути, проходимые последовательно в две следующие друг за другом единицы времени, не всегда складываются, но также часто вычитаются». Для коэффициента диффузии Эйнштейн нашел выражение: $D = \frac{RT}{N_A 6\pi a\eta}$, где R — газовая постоянная, T — термодинамическая температура, N_A — число Авогадро, a — радиус частицы,

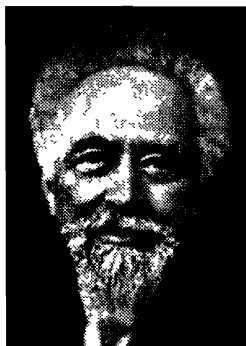
η — вязкость жидкости. Таким образом, измеряя под микроскопом среднее смещение броуновской частицы за время t и зная другие величины, с использованием формулы Эйнштейна можно определить постоянную Авогадро.

В своих опытах Перрен изготавливал однородную эмульсию броуновских частиц, то есть частиц шарообразной формы одинакового радиуса, из гуммигута или мастики. Различными остроумными способами Перрен определял с большой точностью радиус шариков эмульсии и их плотность. Если поместить такую эмульсию в жидкость, то в результате броуновского движения частицы будут стремиться распределиться по всему объему жидкости. Первые опыты Перрен провел над распределением концентрации эмульсии в поле силы тяжести. С молекулярно-кинетической точки зрения при равновесии должна установиться «эмульсионная атмосфера», в которой концентрация должна подчиняться барометрическому закону:

$$n(h) = n_0 \exp(-m_{эфф}gh/kT).$$

Здесь $n(h)$ — концентрация эмульсии на высоте h , n_0 — концентрация на высоте $h = 0$, $k = R/N_A$ — постоянная Больцмана, эффективная масса частицы эмульсии равна $m_{эфф} = (4/3)\pi a^3(\rho_э - \rho_ж)$, где $\rho_э$ и $\rho_ж$ — плотности шарика эмульсии и жидкости. Измеряя под микроскопом $n(h)$ и n_0 , можно определить число Авогадро. Из его измерений шестнадцатью различными методами следовало, что число Авогадро имеет значение в пределах от $6,0 \cdot 10^{23}$ до $7,5 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ с наиболее вероятным значением $N_A = 6,4 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

На основании своих измерений Перрен пришел к выводу: *«Нельзя не удивляться, видя, как согласуются между собой результаты исследования столь различных явлений. Если мы вспомним, что одна и та же величина получается в результате варьирования условий и явлений, к которым прилагаются эти методы, — мы приходим к заключению, что реальность молекулы имеет вероятность, весьма близкую к достоверности»* (Ж. Перрен. Атомы. М.: ГНТИ, 1924).



Перрен

После опытов Перрена Оствальд, упорно отрицавший вместе с Махом реальность атомов и молекул, в 1908 году писал: *«Я убедился, что мы недавно получили экспериментальное доказательство дискретного или зернистого строения вещества»*. Подводя итог своим экспериментам, Перрен в 1912 году говорил: *«Атомная теория восторжествовала. Некогда многочисленные, ее противники повержены и один за другим отрекаются от своих взглядов, в течение столь длительного времени считавшихся обоснованными и полезными»*.

Другое убедительное доказательство атомистического строения вещества провели Резерфорд (*E. Rutherford*) и Ройдс (*T. Royds*) в 1909 году. Резерфорд говорил: «Существовала общепринятая точка зрения, что убедительное доказательство атомной структуры вещества невозможно по самой природе вещей и что атомная теория по необходимости останется гипотезой, не поддающейся проверке прямыми методами. Однако в результате современных исследований появились такие новые и мощные экспериментальные методы, что мы вполне можем теперь вернуться к вопросу о существовании более убедительных доказательств достоверности атомарного строения вещества». Резерфорд и Ройдс использовали явление радиоактивного распада и свойства возникающих при этом α -частиц. Было замечено, что при радиоактивном распаде выделяется гелий, причём из 4 грамм радия выделяется $0,46 \text{ мм}^3$ гелия в день, то есть $5,32 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$. Резерфорд и Ройдс сосчитали, что число α -частиц, которые вылетают из 1 г радия в 1 с равно $13,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Все эти α -частицы после присоединения к ним двух электронов становятся атомами гелия, которые занимают объем $5,32 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3$. Теперь нетрудно сосчитать число

атомов в 1 см^3 :
$$\frac{13,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}}{5,32 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}} = 2,56 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$
. Эта величина очень близ-

ка к числу Лошмидта, полученному на основе молекулярно-кинетических представлений.

Таким образом, в начале XX века атомно-молекулярная гипотеза была непосредственно доказана, и уже ни у кого она не вызывала сомнений. Но, как говорил Эйнштейн: «К сожалению, законы природы становятся вполне понятными только тогда, когда они уже неверны». Дело в том, что к тому времени накопилось уже большое количество опытных фактов, которые неумолимо приводили к выводу, что атом, представляемый со времен Демокрита как мельчайшая неделимая, т. е. бесструктурная частица вещества, в природе не существует! Так что еще до опытов Перрена возникла проблема структуры атома, т. е. встал вопрос о том, из чего состоит атом, как он устроен.

Каковы же факты, которые лишили первоначальное понятие «атом» его прежнего смысла? Прежде всего, это — открытие дискретности электрического заряда и открытие электрона как частицы, несущей наименьший электрический заряд. Далее — явление радиоактивности и радиоактивного превращения элементов, рентгеновское излучение, спектры светящихся тел и многие другие факты. Надо отметить, что выдающиеся физики прошлого уже предполагали, что атом не является бесструктурной частицей. Выше были приведены высказывания Ньютона по этому поводу. В 1834 году Фарадей писал: «Имеется огромное количество фактов, составляющих нас думать, что атомы вещества каким-то образом одарены электрическими силами или связаны с ними и им они обязаны своими

наиболее замечательными свойствами». О том, что атом не может быть бесструктурным, говорил также Максвелл.

Теперь все по порядку.

1.6. КАК БЫЛ ОТКРЫТ ЭЛЕКТРОН

Открытие электрона как первой элементарной частицы явилось результатом долгих исследований и блестящих экспериментов физиков XIX века. Чрезвычайно важными оказались законы электролиза, которые открыл в 1833 году великий английский физик Майкл Фарадей (*M. Faraday*, 1791–1867).

Фарадей проводил экспериментальные исследования в области электричества, магнетизма, магнитооптики, электрохимии. Им сделано множество открытий: закон электромагнитной индукции, законы электролиза, экстратоки при замыкании и размыкании цепи, вращение плоскости поляризации света в магнитном поле и др. Он ввел различные понятия, которые широко используются в физике: катод, анод, ионы, электролиз, электролиты, анион, катион, подвижность, электроды, диэлектрическая проницаемость, понятие поля и силовые линии поля. Он является одним из создателей учения об электромагнитном поле. Фарадей экспериментально доказал закон сохранения электрического заряда. Он высказал гипотезу об электромагнитной природе света. Его экспериментальные исследования легли в основу созданной Максвеллом теории электромагнетизма.

Явление электролиза объясняется тем, что в растворах электролитов образуются ионы. Термин «ион» («странник») Фарадей ввел для обозначения «заряженных» атомов, которые возникают в результате диссоциации (распада) молекул в растворе. Фарадей показал, что если через растворы различных веществ, молекулы которых состоят из одновалентных ионов, пропускать одно и то же количество электрического заряда, которое назы-



Фарадей

вают числом *Фарадея*, то на электродах всегда выделяется количество вещества, равное одному грамм-атому ионов этого вещества. Опыты показали, что число *Фарадея* равно $F = 96\,485 \text{ Кл/моль} = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ СГСЭ/моль}$. Если пропускать ток через растворы с двухвалентными ионами, то их один грамм-атом несет с собой удвоенный заряд *Фарадея*, один грамм-атом трехвалентных ионов — утроенный и т. д. Но по закону Авогадро один грамм-атом любого вещества содержит одно и то же количество частиц, равное числу Авогадро N_A . Естественно считать, что весь заряд, переносимый одним грамм-атомом, равномерно распределен между всеми этими N_A частицами. Поэтому заряд, переносимый одновалентным ионом, имеет вполне определенную величину:

$$e = F / N_A = \frac{2,895 \cdot 10^{14} \text{ СГСЭ/моль}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Заряд, переносимый двухвалентным ионом, будет равен $2e$ и т. д. Таким образом, разные ионы могут нести на себе заряды $e, 2e, 3e, \dots$, и никогда не встречаются ионы с дробной частью заряда e . Впервые идею о дискретности электрического заряда высказал английский физик Джорж Стони (*G. Stoney*, 1826–1911) еще в 1874 году. Он же впервые дал оценку неизвестного электрического заряда, поделив число *Фарадея* на число Авогадро. По его оценке этот заряд соответствовал 10^{-20} Кл , что близко к современному значению. Заряд одновалентного иона водорода он назвал вначале словом «*электрин*».

К выводу о дискретности электрического заряда пришел также немецкий физик Герман Гельмгольц (*G. L. F. Helmholtz*, 1821–1894). В своей *Фарадеевской лекции* в 1881 году он говорил: «Если мы признаем существование атомов химических элементов, то мы не можем избежать и дальнейшего заключения, что электричество, как положительное, так и отрицательное, разделено на определенные элементарные количества, которые ведут себя, как атомы электричества».

Надо сказать, что теоретические представления о носителе элементарного, т. е. наименьшего электрического заряда высказывались давно. Еще в 1749 году американский физик и политический деятель Бенджамин Франклин (*B. Franklin*, 1706–1790) писал: «*Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц... Электрическая субстанция отличается от обычной материи в том отношении, что частички последней взаимно притягиваются, а частицы первой отталкиваются друг от друга*».



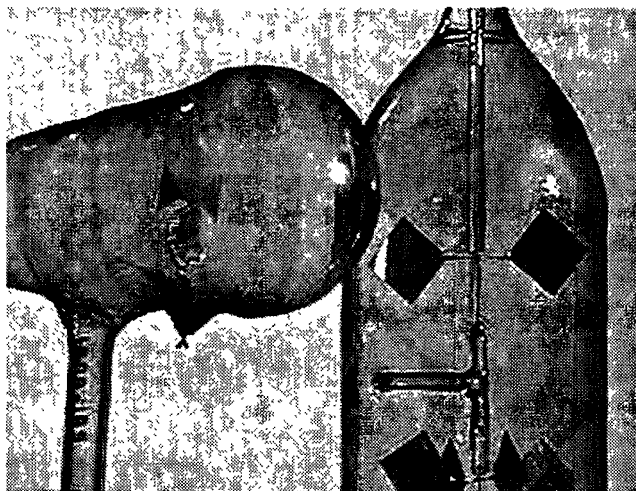
Гельмгольц

Аналогичные представления развивал петербургский профессор Франц Эпинус (*F. Aepinus*, 1724–1802), который рассматривал «*электрическую жидкость*» в виде отгаликивающих друг от друга частиц.

Наименьшую величину электрического заряда по предложению Стони в 1891 году стали называть «*электроном*». Вначале со словом «электрон» не связывали понятия о частице. Это было лишь обозначение элементарного электрического заряда, который переносит с собой одновалентный ион. Существование электрона как частицы, обладающей определенной массой и элементарным электрическим зарядом, было доказано совсем в других опытах. Опыты такого рода, связанные с исследованиями *электрических разрядов* в газах, впервые начал проводить английский физик Фрэнсис Гауксби (*F. Hawksbee*, 1666–1713) еще в 1706 году. В 1858 году немецкий стеклодув, владелец кустарной мастерской Генрих Гейсслер (*H. Geissler*, 1815–1879) построил стеклянную трубку с разреженным газом и двумя впаянными в стекло электродами (*гейсслерова трубка*), которая оказалась очень удобным инструментом для изучения спектра газа. Если оба электрода присоединить к разным полюсам источника постоянного тока, то по цепи пойдет ток, а газ начнет светиться. Примерно в то же время изучением электрических разрядов в газах занялся немецкий физик и математик Юлиус Плюккер (*J. Plücker*, 1801–1868). Он установил, что проводимость газа в трубке зависит от его плотности, и она возрастает, когда часть газа из трубки откачана. При этом оказалось, что каждый газ светится своим характерным цветом. Так Плюккер в 1858 году изобрел светящиеся трубки. Теперь они широко используются в рекламе и различных шоу. По мере увеличения разрежения в трубке вблизи катода появляется темное пространство «*катодное пятно*», которое при дальнейшем откачивании газа расширяется и затем заполняет всю трубку. Тогда она перестает светиться.

Исследования Плюккера в 1859 году показали, что это темное пространство пронизывают какие-то невидимые для глаза «*лучи*». В 1876 году немецкий физик Эуген Гольдштейн (*E. Goldstein*, 1850–1930) назвал их *катодными лучами*. Было определено, что эти лучи отклоняются в магнитном поле и имеют отрицательный заряд. Многие тайны катодных лучей были раскрыты в серии блестящих опытов английского физика Уильяма Крукса (*W. Crookes*, 1832–1919) с помощью так называемых «*круковских трубок*». Этим трубкам с большим разрежением он придавал самые разнообразные формы.

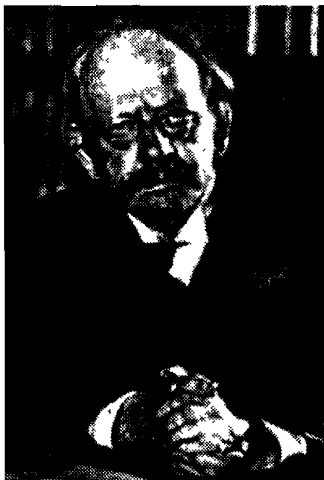
Если на пути катодных лучей поставить металлический экран (Крукс использовал мальтийский крест), то за ним на противоположной стороне трубки наблюдалась его тень. Это означало, что внутри трубки катодные лучи распространяются прямолинейно. Введя в трубку радиометр, изобретенный им в 1875 году, Крукс обнаружил вращение радиометра, когда тот оказывался на пути катодных лучей, т. е. катодные лучи оказывают механическое воздействие. При поднесении магнита пучок лучей и обра-



Круксова трубка с мальтийским крестом и радиометр

зуемая им тень смещаются в сторону. Это значит, что катодные лучи несут электрический заряд. Крукс считал, что катодные лучи — это «лучистая материя» (этот термин предложил Фарадей в 1816 году), представляющая собой четвертое состояние вещества, которое он рассматривал как «ультрагазообразное состояние, столь же далекое от газообразного, насколько то далеко от жидкого». Крукс писал: «Изучая четвертое, лучистое состояние материи, мы, как мне кажется, имеем под руками и в сфере наших исследований те первичные атомы материи, из которых, как вполне основательно предполагают, состоят все тела природы». Теперь четвертое состояние вещества называют плазмой.

Уильям Крукс, Кромвелл Вэрли (*C. F. Varley*, 1828–1883) и другие полагали, что катодные лучи образуются молекулами остаточного газа, содержащегося в трубке после откачивания, когда они, соприкасаясь с катодом, заряжаются отрицательно и отгалькиваются от него. Наряду с молекулярной гипотезой Крукса о происхождении катодных лучей существовала волновая гипотеза, которую поддерживали Густав Видеман (*G. Wiedemann*, 1826–1899), Эуген Гольдштейн, Генрих Герц (*H. Hertz*, 1857–1894) и Филипп Ленард (*P. Lenard*, 1862–1947). Согласно этой гипотезе катодные лучи связаны с возмущением эфира. Однако волновая гипотеза противоречила факту, что катодные лучи отклоняются в магнитном поле, поскольку магнитное поле на волны не действует. Но и гипотеза Крукса не могла объяснить другого установленного в 1892 году факта, что катодные лучи проходят сквозь тонкие пластинки алюминия: было непонятно, как наэлектризованные молекулы могут проходить сквозь твердое тело. В дальнейших опытах Жана Перрена в 1895 году было показано, что катодные



Томсон

лучи несут с собой отрицательный электрический заряд, так что их материальная природа более вероятна, чем волновая. Но это еще не было открытием электрона. Существование электрона как частицы и носителя элементарного электрического заряда наиболее точно и убедительно было доказано в опытах выдающегося английского физика Джозефа Джона Томсона (*Joseph John Thomson*, 1856–1940).

Дж. Дж. Томсон окончил университет в Кембридже в 1880 году. После открытия электрона он в 1899 году обнаружил электроны в фототоке и открыл эффект термоэлектронной эмиссии. Он разработал теорию движения электронов в электрическом и магнитном полях. В 1903 году предложил известную капельную модель атома. В 1907 году указал принцип действия масс-спектрометра. Разработал метод парабол для определения относительных масс ионов различных газов, что имело большое значение для исследования изотопов. Он является одним из основоположников классической электронной теории металлов. За исследования прохождения электричества через газы Томсон был удостоен Нобелевской премии в 1906 году. Он создал блестящую школу физиков.

Проделав ряд остроумных экспериментов с катодными лучами, Томсон пришел к выводу: «Я не могу избавиться от заключения, что катодные лучи являются зарядами отрицательного электричества, которые переносятся частицами материи», и продолжал: «Что это за частицы? Атомы это или молекулы, или материя в состоянии еще более тонкого дробления?». И он стал проводить более тонкие эксперименты.

Схема одной из его установок изображена на рисунке 1.1. Этот прибор представляет собой вакуумную электронно-лучевую трубку.

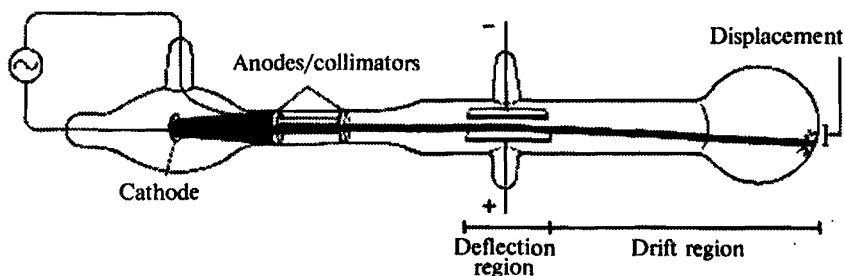


Рис. 1.1

Накаливаемый катод является источником катодных лучей, которые ускоряются под действием разности потенциалов между анодом и катодом. В центре анода имеется отверстие. Катодные лучи, прошедшие это отверстие и двигаясь прямолинейно со скоростью v , попадают в некоторую точку на стенке трубки напротив отверстия в аноде. Если стенка покрыта флуоресцирующим веществом, то попадание частиц на стенку проявляется как светящееся пятнышко. На своем пути частицы проходят между пластинами конденсатора, к которым может быть приложено напряжение от батареи. Если включить эту батарею, то пучок частиц отклоняется электрическим полем с напряженностью E под действием силы $F_e = eE$, и на экране возникает пятнышко. Создавая в области между пластинами конденсатора также однородное магнитное поле с индукцией B , перпендикулярное плоскости рисунка, можно вызвать отклонение пятнышка в том же или обратном направлении под действием силы Лоренца $F_m = \frac{e}{c}vB$. Если скомпен-

сировать отклонение катодных частиц электрическим полем с помощью магнитного поля, то в этом случае $F_e = F_m$, т. е. $v = cE/B$. Измерения сводятся к точному определению напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Зная скорость частиц (и значит, их энергию), с помощью формулы $mv^2/2 = eV$ можно определить отношение заряда к массе корпускулы e/m (удельный заряд). Он оказался равным $1,7 \cdot 10^7$ СГСЕ. Это почти в 1840 раз больше, чем удельный заряд самого легкого иона водорода, который был определен с помощью электролиза. Если считать, что заряд корпускулы равен по величине заряду иона водорода, то масса катодной частицы оказывается почти в 1840 раз меньше массы иона водорода.

Так была открыта первая «элементарная» частица с массой $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28}$ г и с наименьшей величиной электрического заряда. 30 апреля 1897 года Дж. Дж. Томсон доложил о своих исследованиях и объявил, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц, которые он назвал *корпускулами*. В дальнейшем эти частицы получили название —

электроны. 30 апреля 1897 года считается днем рождения электрона. Эксперименты показали также, что отношение e/m для катодных лучей не зависит ни от сорта остаточного газа, заполняющего разрядную трубку, ни от материала катода. Это приводило к вполне естественному выводу, что катодные лучи в разных экспериментах состоят из одних и тех же частиц. Томсон писал: «...мы имеем в катодных лучах материю в новом состоянии, состоянии, в котором дробление материи происходит намного дальше, чем в обычном газовом состоянии: состояние, в котором вся материя, т. е. материя из разных источников, таких как водород, кислород и т. д., является одного и того же вида, из нее построены все химические элементы». Позднее он вспоминал, что «вначале лишь немногие верили в существование этих тел, меньших, чем атомы», в том числе и его английские коллеги. В частности, английский физик Оливер Лодж (O. Lodge, 1851–1940) в 1902 году писал: «... электрон — это чисто гипотетический заряд, изолированный от атома», хотя Томсон не раз выступал с докладом об электроне. К тому времени Джордж Фитцджеральд (G. F. FitzGerald, 1851–1901) своими опытами подтвердил, что томсоновские корпускулы, образующие катодные лучи, действительно являются электронами. Сам же Томсон продолжал использовать термин «корпускула» вплоть до 1913 года. Таким образом, Томсон был первым, кто заявил, что «корпускулы» являются составной частью атома. В то время это был смелый шаг, поскольку Томсон стал говорить о структуре атомов, существование которых еще не было экспериментально доказано.

В связи с открытием Томсона интересен исторический факт: несколько раньше Томсона немецкий физик Вальтер Кауфман (W. Kaufmann, 1871–1947), также проводивший эксперименты с катодными лучами, получил результаты, такие же, как и Томсон. Однако Кауфман не мог сделать вывод об открытии электрона, поскольку он стоял на позициях философского течения, основанного Махом, и называемого *позитивизмом*. Позитивизм позволял объяснение явлений лишь на основе чувственного опыта. Поэтому Кауфман не мог признать существование субмикроскопической частицы, которая была недоступна непосредственному наблюдению. Так благодаря своим философским воззрениям Кауфман не стал открывателем электрона.

Дж. Дж. Томсон со своими сотрудниками проводил также первые эксперименты по определению абсолютной величины заряда электрона. Такие опыты были очень трудными и требовали большого искусства экспериментатора. В результате измерений было получено для заряда электрона значение $e = 6,5 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ. Это хорошо согласовывалось с известными в то время опытными данными.

Наиболее точные измерения заряда электрона проводил американский физик Роберт Милликен (Robert A. Millikan, 1868–1953), начиная с 1906 года.

Экспериментальная установка Милликена изображена на рис. 1.2. Метод Милликена состоял в непосредственном измерении заряда очень ма-

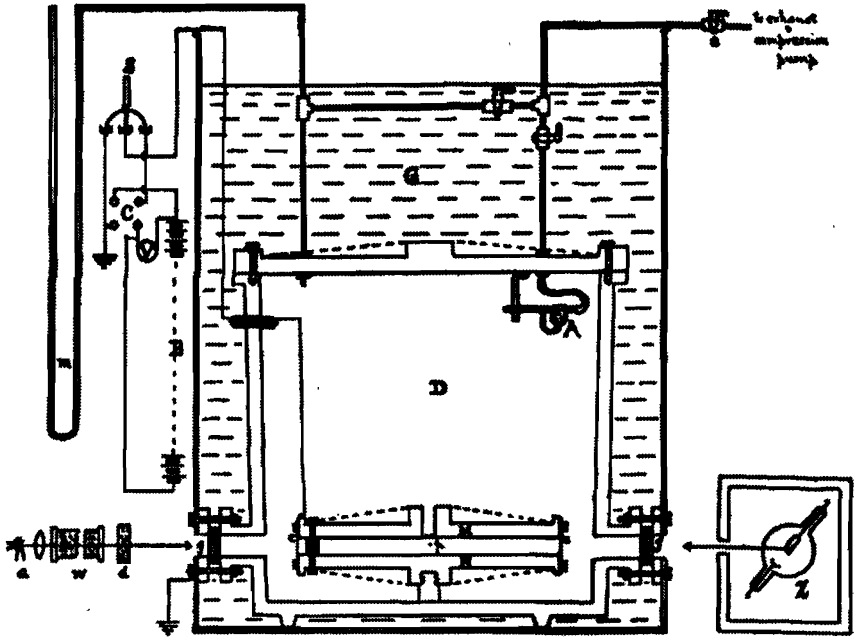


Рис. 1.2

леньких капелек масла (Phys. Rev. II (2), p. 109, 1913). Такие капельки расплывались между пластинами конденсатора. Проходя через горлышко пульверизатора, капельки в результате трения электризуются. Движение отдельной капельки можно наблюдать в микроскоп. Если пластины конденсатора не подключены к батарее, то капля будет свободно падать. Из-за малых размеров капли она довольно быстро станет падать равномерно, когда ее сила тяжести с учетом силы Архимеда уравнивается силой сопротивления воздуха. Если ионизовать воздух между пластинами конденсатора с помощью рентгеновских лучей, то заряд капли изменится из-за притяжения к ней образующихся ионов противоположного знака. Тогда в прежнем электрическом поле конденсатора капля станет двигаться с другой скоростью.

Измерения Милликена сводились к определению изменения заряда капли при ее перезарядке. Из его экспериментов следовало, что эти изменения являются целыми кратными одной и той же величины. Милликен проделал большое количество опытов по точному определению заряда электрона. В 1910 году он получил значение заряда $4,891 \cdot 10^{-10}$, а в 1913 году — $4,774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Согласно современным измерениям заряд электрона равен $4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Так непосредственно было доказано, что заряд складывается из дискретных единиц, и что в природе существует элементарный электрический заряд и его материальный носитель — *электрон*.

За исследования в области элементарных зарядов и фотоэлектрического эффекта Роберт Милликен был удостоен Нобелевской премии в 1923 году.

Теперь известно, какую колоссальную роль играет электрон в самых разнообразных процессах и явлениях, но в то время открытие электрона породило много проблем. В первую очередь пришлось признать сложность строения атома, в который должны входить электроны как его составная часть. При этом возникали вопросы: как и почему электроны связаны в атоме? Сколько их в атоме? Как они движутся и как их движения связаны с излучением атомов? Наряду с этим из-за электрической нейтральности атома возникла проблема распределения положительного заряда и его роли во внутреннем строении атома.

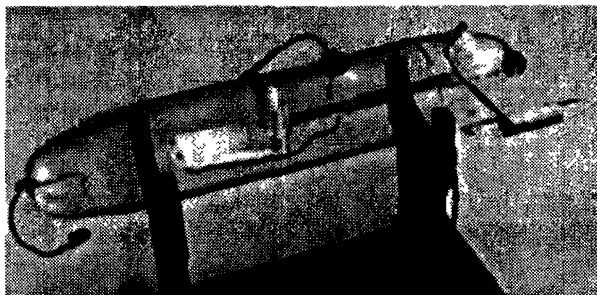
1.7. X-ЛУЧИ И «ЛУЧИ БЕККЕРЕЛЯ»

Важную роль в развитии физики атома сыграли также другие открытия конца XIX века. В 1895 году немецкий физик-экспериментатор из Вюрцбурга Вильгельм Конрад Рентген (*W. Röntgen*, 1845–1923), как и многие другие в то время, проводил исследования катодных лучей. Однажды он обратил внимание, что полоска бумаги, покрытая флуоресцирующей солью бария и лежащая в стороне от работающей трубки Крукса (см. снимок этой трубки), светится.

После многочисленных экспериментов и долгих напряженных размышлений он пришел к выводу, что им открыты новые, как он называл, *X-лучи*. Они возникали в том месте, куда попадали катодные лучи. *X-лучи* называют также *рентгеновским излучением*.



Рентген



Трубка Крукса

Рентген предложил конструкцию трубки для получения X-лучей. Она состояла из наклонного платинового антикатода и вогнутого катода. Современные рентгеновские трубки имеют разнообразные формы и параметры в соответствии с их предназначением. Рентгеновское излучение возникает при бомбардировке быстрыми электронами антикатода (или анода). При этом антикатод сильно нагревается, поэтому в мощных рентгеновских трубках антикатод изнутри охлаждается проточной водой.

Рентгеновское излучение возникает при бомбардировке быстрыми электронами антикатода (или анода). При этом антикатод сильно нагревается, поэтому в мощных рентгеновских трубках антикатод изнутри охлаждается проточной водой.

С помощью X-лучей Рентген сфотографировал закрытый деревянный футляр с гирьками, и на фотографии четко проступали изображения гирек. Он же получил первую рентгенограмму руки своей супруги. На этом снимке были ясно видны кости руки и ее обручальное кольцо. Все это демонстрировалось публично и будоражило общественность. Свойства X-лучей пугали воображение, поскольку они легко пронизывали человеческое тело и проникали даже сквозь закрытые дверцы сейфов. За открытие X-лучей Рентген стал первым Нобелевским лауреатом по физике в 1901 году.

Исследования Рентгена показали, что X-лучи в магнитном поле не отклоняются и, следовательно, не являются потоком заряженных частиц. Однако он не обнаружил преломления и дифракции X-лучей и высказал гипотезу, что эти лучи являются своеобразными *продольными* электромагнитными волнами. Лишь опыты английского физика Чарлза Баркла (*Ch. Barkla*, 1877–1944) в 1905 году по рассеянию X-лучей показали, что, если это излучение имеет волновую природу, то оно должно быть поперечно поляризовано. Баркла установил также, что рентгеновское излучение имеет разные свойства.

Существует *тормозное* рентгеновское излучение. Оно образуется при торможении электронов в антикатоде и не зависит от материала антикатода. Наряду с этим наблюдается *характеристическое* рентгеновское излу-



Первый рентгеновский снимок

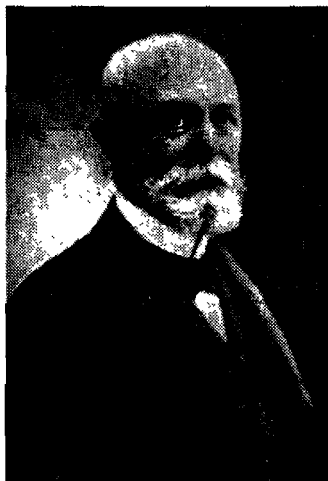
чение, которое существенно зависит от материала, из которого сделан антиматод. Тормозное излучение имеет сплошной спектр. Его называют также *белым* рентгеновским излучением.

Характеристическое излучение является линейчатым — оно состоит из отдельных линий, характерных для данного вещества.

В 1912 году немецкий физик Макс Лауэ (*M. Von Laue*, 1879–1960) разработал теорию интерференции рентгеновских лучей, предложив рассматривать кристаллы как дифракционные решетки для рентгеновского излучения. В том же году эта теория была блестяще подтверждена экспериментально сотрудниками Лауэ Вальтером Фридрихом (*W. Friedrich*, 1883–1968) и Паулем Книппингом (*P. Knipping*, 1883–1935). Так было доказано, что рентгеновское излучение, так же как и свет, представляет собой поперечные электромагнитные волны. Только в отличие от света рентгеновское излучение характеризуется гораздо меньшими длинами волн — около 10^{-8} – 10^{-9} см. За открытие дифракций рентгеновского излучения Лауэ в 1914 году был удостоен Нобелевской премии.

В 1912 году английский физик Генри Брэгг (*G. Bragg*, 1862–1942) и его сын Лоуренс Брэгг (*L. Bragg*, 1890–1971) использовали явление дифракции рентгеновского излучения на кристаллах для изучения кристаллических структур. Они определили длину волны излучения и константы кристаллической решетки, заложив основы рентгеноструктурного анализа. За эти исследования они были удостоены Нобелевской премии в 1915 году.

В дальнейшем в 1916 году Питер Дебай (*P. Debye*, 1884–1966) и Пауль Шеррер (*P. Scherrer*, 1890–1970) разработали метод исследования материалов с помощью дифракции рентгеновского излучения на поликристаллических пластинках.



Беккерель

В 1896 году французский физик Антуан Беккерель (*A. Becquerel*, 1852–1923) по счастливому стечению обстоятельств открыл еще более странный тип излучения.

Было это так: Беккерель изучал вопрос о возможности испускания X -лучей фосфоресцирующими веществами (урановыми рудами) после длительного их облучения солнечным светом. Он подготовил опыт, но осуществить его сразу не удалось, потому что погода испортилась и солнце появлялось лишь на короткое время. Его установка содержала фотопластинку в рамке из черной ткани, прикрытую алюминиевой пластинкой. На этой пластинке находился тонкий медный крест и над ним располагался препарат с двойным сульфатом калия и урана. В ожидании хорошей погоды он все это запер в ящике своего стола. Так и не дождавшись улучшения погоды, Беккерель к счастью решил проявить фотопластинку. Он был немало удивлен, увидев на ней после проявления весьма четкий контур креста (см. этот снимок). Так неожиданно оказалось, что для получения фотографического эффекта вовсе не надо предварительно освещать урановую руду солнечным светом.

Изучая открытое явление, Беккерель пришел к выводу, что все соли урана независимо от своего происхождения испускают излучение одной и той же природы, интенсивность которого зависит только от количества урана, содержащегося в соли, т. е. способность к излучению является чисто атомным свойством, характерным для элемента урана. Беккерель заметил также, что под воздействием этого излучения воздух ионизируется — становится проводником электричества. Это позволяет определять вещества, испускающие лучи Беккереля.

10 ... 1903. *Exposition Universelle de St. Louis*
Exposition Universelle de St. Louis
Exposition Universelle de St. Louis



Знаменитый снимок Беккереля

В 1898 году польская и французская физико — химик Мария Склодовская-Кюри (*M. Sklodowska-Curie*, 1867–1934) решила проверить, нет ли других веществ, кроме веществ, содержащих уран, которые испускают лучи Беккереля. После длительных и трудных экспериментов она обнаружила, что соли тория тоже испускают такие лучи. Продолжая свои поиски, она установила, что урановая смоляная обманка — руда, из которой добывают металлический уран, испускает лучи Беккереля с гораздо большей интенсивностью, чем чистый уран. После долгой и упорной работы она вместе со своим мужем французским физиком Пьером Кюри (*P. Curie*, 1859–1906) открыла два новых элемента. Первый они назвали *полонием* (в честь Польши — родины Марии Склодовской-Кюри). Другой элемент, химические свойства которого сходны с барием, назвали *радием*. Интенсивность излучения радия оказалась намного больше интенсивности излучения урана.

Это свойство излучения радия привело потом к новым открытиям и практическим применениям. Радий стал использоваться в медицине, в частности, в борьбе с раковыми заболеваниями. Свойство радия возбуждать, как и солнечные лучи, флуоресценцию различных флуоресцирующих веществ, используется, например, в часах со светящимся циферблатом — при совсем ничтожной доли радия к сернистому цинку дает состав, непрерывно светящийся в темноте.

В 1898 году супруги Кюри ввели термин «*радиоактивность*» для обозначения свойства вещества испускать «*лучи Беккереля*».

За открытие радиоактивности Беккерелю, и за работы по исследованию радиоактивности супругам Кюри была присуждена Нобелевская премия в 1903 году.

По определению Резерфорда, «*...радиоактивность — это атомное явление, сопровождающееся химическими изменениями, в котором порождаются новые виды вещества. Эти изменения должны происходить внутри атома, а радиоактивные элементы являются, должно быть, спонтан-*



Супруги Кюри

ными превращениями атомов... Поэтому радиоактивность нужно рассматривать как проявление внутриатомного химического процесса».

В конце 1899 года Беккерель обнаружил, что испускаемые лучи неоднородны и имеют корпускулярную природу, перенося электрический заряд — в магнитном поле часть лучей отклоняется в одном направлении, а другая — в противоположном. Этот факт подтвердил также Резерфорд. Он писал: «Эти опыты показывают, что излучение урана является сложным и состоит по крайней мере из двух различных видов: одно, очень быстро поглощаемое, назовем для удобства α -излучением; другое, более проникающее, назовем β -излучением». Вскоре французский физик Поль Виллар (*P. Villard*, 1860–1934) показал, что имеется и третья составляющая излучения, которую раньше не замечали. Она не отклоняется магнитным полем и, следовательно, по своей природе сходна с X -лучами. Ее назвали гамма — излучением. Беккерель показал, что β -лучи, испускаемые разными радиоактивными веществами, имеют разные скорости и отклоняются электрическим полем. Он впервые измерил отношение заряда β -частиц к их массе, и установил, что это отношение такого же порядка как и для катодных лучей. Супруги Кюри установили, что эти лучи несут отрицательный заряд.

Теперь хорошо известно, что α -лучи представляют собой ядра атомов гелия, но на доказательство этого факта Резерфорду понадобилось 10 лет трудных экспериментов. Крукс заметил, что при попадании α -частиц на сернистый цинк ZnS он начинает светиться. Это явление Крукс использовал для создания *спинтарископа* — прибора, который позволял видеть вспышки от отдельных α -частиц, попадающих на экран из ZnS . Чтобы убедиться, что вспышка вызывается именно одной α -частицей, Резерфорд и Гейгер в 1908 году изобрели специальный прибор для регистрации отдельных α -частиц — *счетчик Гейгера*. Регистрация частиц производится по их ионизирующему действию при прохождении через газ. Сопоставляя результаты подсчета α -частиц с помощью их счетчика и с помощью спинтарископа, Резерфорд и Гейгер показали, что каждая α -частица порождает *сцинтилляцию* (*scintilla* — искра). Так был твердо обоснован метод сцинтилляций.

Эксперименты Резерфорда и английского физико — химика Фредерика Содди (*F. Soddy*, 1877–1956) позволили объяснить известный в то время странный факт: во всех минералах, содержащих радиоактивные вещества, всегда присутствует гелий. Они показали, что гелий ни откуда не попадает в радиоактивные вещества, а образуется в них — радиоактивное излучение само содержит в себе дважды ионизованные атомы гелия. Этот вывод поставил под сомнение существовавшее со времен Лавуазье и Дальтона убеждение, что химические элементы вечны и неизменны и что они не могут переходить друг в друга. Дальнейшие исследования Резерфорда, Содди и Ройдса привели к открытию радиоактивного распада элементов.

В 1908 году Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии за раскрытие природы радиоактивного распада. Резерфорд нашел пути и законы естественного превращения элементов. Другими словами, он доказал *делимость* атомов.

В 1903 году Пьер Кюри обнаружил, что соли урана непрерывно выделяют тепло, причем очень большое, если учесть небольшую массу радиоактивного препарата. Он измерил выделяющееся тепло, и оказалось, что 1 г радия выделяет тепло примерно 25,5 кал/час. Но за 1 час распадается лишь ничтожная часть радия — всего $5 \cdot 10^{-8}$ г. При распаде же 1 г радия выделяется колоссальное количество энергии — $28 \cdot 10^5$ ккал. Для сравнения, при сгорании 1 г водорода, т. е. при соединении с 8 г кислорода, выделяется 34 ккал. По этому поводу Резерфорд писал: «...теперь точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

В своей книге «Современное развитие физики» английский ученый Ветгем в 1904 году писал: «Профессор Резерфорд в шутку передавал ав-

тору этой книги тревожную мысль, что если бы удалось открыть надлежащий детонатор, то можно было бы вызвать волну взрыва атомического разложения во всем веществе, которое произвело бы превращение всей массы нашего земного шара и оставило бы от него только клуб гелия».

В то же время обнаружилось смертоносное воздействие радиоактивного излучения на живые организмы. Это взбуряло общественность, и был поднят вопрос о пользе и необходимости научных исследований. Пьер Кюри после присуждения ему Нобелевской премии в 1905 году говорил: *«В преступных руках радий может стать весьма опасным, и мы можем теперь задать себе вопрос, выигрывает ли человечество от знания секретов природы, достаточно ли оно созрело, чтобы пользоваться ими, не принесет ли ему вред это знание. Пример открытия Нобеля весьма характерен. Наличие мощных взрывчатых веществ сделало возможным проведение грандиозных работ. Но вместе с тем взрывчатые вещества являются страшным средством разрушения в руках преступников, вовлекающих народы в войну. Я склонен придерживаться точки зрения Нобеля, что человечество извлечет из новых открытий больше хорошего, чем плохого».*

1.8. ЦВЕТНОЙ «ПОРТРЕТ» АТОМОВ

В 1834 году английский физик и химик Уильям Тальбот (*W. Talbot*, 1800–1877), изобретатель фотографии на бумаге, высказал идею, что каждая светлая линия в спектре излучения является характерной для излучающего ее элемента. Он писал: *«Когда в спектре пламени появляются какие-нибудь определенные линии, они характеризуют металл, содержащийся в пламени».* К такому же выводу пришел Генрих Гейсслер. Он изучал явление свечения газа с помощью *«трубки Гейсслера»* и нашел, что цвет свечения зависит от природы газа. В 1858 году он высказал предположение, что химическая природа газа может быть определена по цвету свечения. Спектры газов изучал также Плюккер с помощью сконструированных им газоразрядных трубок. В 1859 году он установил, что спектр газового разряда характеризует природу этого газа. Наблюдая свечение разных газов, в 1865 году Плюккер ввел деление спектров на линейчатые (дискретные) и спектры с полосами. Он обнаружил три первых линии в спектре водорода, который в чистом виде впервые был получен в 1766 году английским ученым Генри Кавендишем (*H. Cavendish*, 1731–1810).

Создателями спектрального анализа и первыми исследователями атомных спектров стали немецкие ученые Густав Кирхгоф (*G. Kirchhoff*, 1824–1887) и Роберт Бунзен (*R. Bunsen*, 1811–1899). В 1860 году они опубликовали работу *«Химический анализ с помощью наблюдений спектра»*, в которой изложили основы спектрального анализа атомов.

Их успешным экспериментальным работам по спектральному анализу способствовали *«горелка Бунзена»* и специальный спектрограф боль-

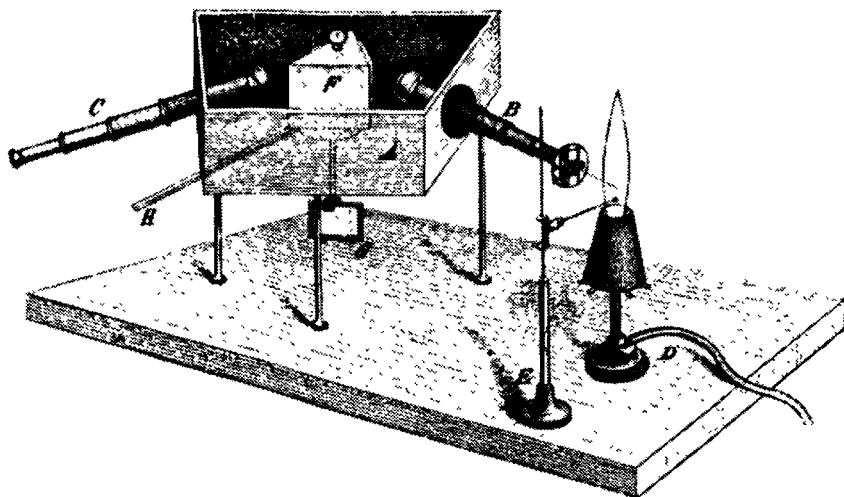


Рис. 1.4

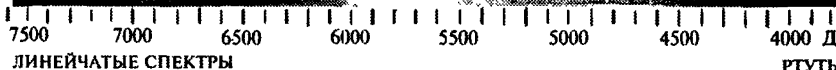
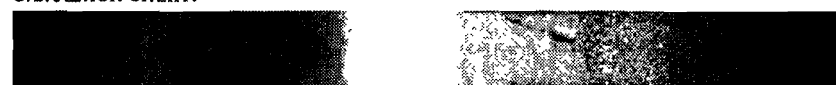
шой разрешающей силы (рис. 1.4). Горелка давала несветящееся пламя с довольно высокой температурой. Это позволяло переводить в парообразное состояние различные химические вещества и наблюдать их спектры, не осложненные собственными линиями пламени.

Кирхгоф и Бунзен открыли *закон инверсии (обращения) спектра*: все газы поглощают в точности те же длины волн, которые они способны излучать. Они подтвердили справедливость идеи Тальбота, и в 1861 году открыли новые элементы — рубидий и цезий (*Rubeus* — красный, *Caesius* — голубой) по их характерным линиям спектра. Они объяснили также линии Йозефа Фраунгофера (*J. Fraunhofer*, 1787–1826) как линии поглощения солнечной (и земной) атмосферы. Спектральный анализ света, приходящего от звезд, позволил сделать важный вывод, что Вселенная состоит из одних и тех же элементов. Это было важно потому, что долгое время существовало убеждение, что небесные тела состоят из того, чего нет, и не может быть на Земле. Интересна история открытия гелия. В 1868 году французский астроном Пьер Жансен (*P. Janssen*, 1824–1907) и английский астрофизик Джозеф Локьер (*J. Lockyer*, 1836–1920) независимо друг от друга обнаружили в спектре солнечной короны желтую линию, принадлежащую какому-то неизвестному элементу. Этому элементу Локьер дал название *гелий*, т. е. солнечный элемент. На Земле гелий был открыт в 1895 году английским физиком и химиком Уильямом Рамзаем (*W. Ramsay*, 1852–1916). Ему же принадлежит открытие других инертных газов: аргона (в 1894 году), криптона, ксенона и неона (1898).

В 1814–1815 годах Фраунгофер обнаружил яркую двойную желтую линию в спектрах масляной горелки и свечи. Причины ее возникновения не были исследованы, и никто в то время этим не заинтересовался. Лишь через 43 года английский физик Уильям Сван (1828–1914) показал, что двойная D -линия возникает в спектре пламени спиртовки в присутствии натрия. Однако вывода о том, что эта линия принадлежит натрию, он не сделал. К такому выводу пришли через два года после открытия Свана, в 1859 году, Кирхгоф и Бунзен.

В 1868 году шведский физик Андерс Ангстрем (*A. Ångström*, 1814–1874), измерил длины волн четырех линий видимой части спектра атомарного водорода — H_α , H_β , H_γ , H_δ (рис. 1.5). В это время Дж. Стони (*G. J. Stoney*) предположил, что «линии в спектрах газов должны быть связаны с периодическими движениями внутри отдельной молекулы, а не с беспорядочным движением молекул относительно друг друга», при этом он считал, что «одно периодическое движение в молекуле накаливаемого газа может быть источником целой серии линий в спектре газа». Для подтверждения своих предположений Стони воспользовался измерениями Ангстрема и показал, что три из известных линий атома водорода являются «20-ой, 27-ой и 32-ой гармониками фундаментального колебания, длина волны которого в вакууме» равна $\lambda_0 = 0,13127714$ мм.

СПЛОШНОЙ СПЕКТР



НАТРИЙ



ГЕЛИЙ



ВОДОРОД



Спектры испускания атомов

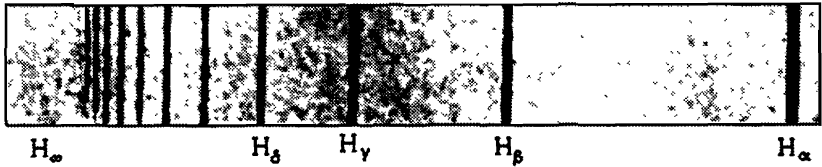


Рис. 1.5

Дальнейшие спектроскопические исследования привели к пониманию важности поисков «эмпирического закона, связывающего различные периоды колебаний, в которых, как мы знаем, может принимать участие одна и та же молекула» (А. Schuster, 1881). Такой закон в 1885 году открыл школьный учитель в Базеле Иоганн Якоб Бальмер (J. Balmer, 1825–1898). В своей первой статье он пророчески писал: «Мне представляется, что водороду... как никакому другому веществу суждено открыть новые пути к пониманию структуры вещества и его свойств. Поэтому численные соотношения между длинами волн первых четырех водородных спектральных линий должны особенно привлечь внимание». Бальмер нашел эмпирическую формулу, с помощью которой можно было с удивительной точно-

стью определить длины волн этих линий: $\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$. Здесь n — целое

число, равное 3, 4, 5, 6. Эмпирическая постоянная $B = 3647,0 \text{ \AA}$. При $n = 3$ по этой формуле определялась длина волны красной линии H_α , при $n = 4$ — зеленой линии H_β , при $n = 5$ — синей линии H_γ , при $n = 6$ — фиолетовой линии H_δ . При больших значениях числа n длины волн соответствуют ультрафиолетовой области, не различимой глазом. В последующих опытах они также были обнаружены. Этот набор спектральных линий стали называть бальмеровской серией.

Другой вид формулы Бальмера оказался чрезвычайно плодотворным для дальнейшего развития атомной спектроскопии.

Еще в 1871 году Стони пришел к выводу, что более удобно «выразить положение всех линий в спектре в шкале обратных длин волн», а не в шкале длин волн, как это было обычно принято. Он обосновывал это так: «С точки зрения целей исследования эта шкала обладает тем большим преимуществом, что система линий с временными периодами, являющимися гармониками одного временного периода, эквидистантна в ней; дальнейшее ее достоинство, позволяющее рекомендовать эту шкалу для общего употребления, состоит в том, что в ней спектр гораздо больше напоминает наблюдаемый в спектроскоп, чем в шкале прямых длин волн, использованной Ангстремом в его классическом представлении спектров... Тогда, если k — волновое число фундаментального движения в эфире, его длина

волны будет $1/k$ миллиметров, а длины волн его гармоник — $1/2k$, $1/3k$ и т. д., т. е. гармоники занимают положения $2k$, $3k$ и т. д. в новой шкале».

Используя эти идеи, шведский физик Иоганнес Ридберг (*J. Rydberg*, 1854–1919) в 1890 году записал формулу Бальмера в виде

$$\nu = c/\lambda = \frac{c}{B} \frac{n^2 - 4}{n^2} = \frac{4c}{B} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \equiv R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Здесь ν частота колебаний, которая связана с длиной волны соотношением: $\lambda = c/\nu$, где c — скорость света в вакууме.

Величина $R = 4c/B$ называется *постоянной Ридберга*. Если заменить в формуле Бальмера число 2 на любое целое число m , то придем к *обобщенной формуле Бальмера*:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

При фиксированном значении числа m число n принимает значения $m + 1$, $m + 2$, ... Из этой формулы при $m = 1$ следует серия *Лаймана* в ультрафиолетовой части спектра, при $m = 2$ — *серия Бальмера* и т. д. Все серии при $m \geq 3$ находятся в инфракрасной и далекой инфракрасной областях. Совокупность всех спектральных серий образуют *спектр* данного атома. Таким образом, обобщенная формула Бальмера описывает спектр атома водорода и представляет собой его своеобразный «портрет», а *бальмеровская серия* является лишь видимой цветной частью этого портрета. Другие атомы имеют совсем другие спектры, и их спектральный портрет, конечно, не описывается обобщенной формулой Бальмера. Каждый атом имеет свой собственный характерный для него спектр, и по этому спектру он может быть определен.

В 1908 году Вальтер Ритц (*W. Ritz*, 1878–1909) на основе эмпирических данных сформулировал «*принцип Ритца*», который называют также «*комбинационным принципом*». Согласно этому принципу частоту любой спектральной линии некоторого элемента можно выразить в виде разности двух членов — «*спектральных термов*».

Спектральные закономерности атома водорода были найдены Бальмером, Ридбергом, Ритцем и другими чисто опытным путем, только на основе результатов измерений. Они носили эмпирический характер и считались «*забавной игрой чисел*». Долгое время не удавалось объяснить, почему образуется этот чстокол отдельных линий определенного цвета, выстроенных в закономерной последовательности, пока многочисленные экспериментальные факты не привели к возникновению квантовых представлений.

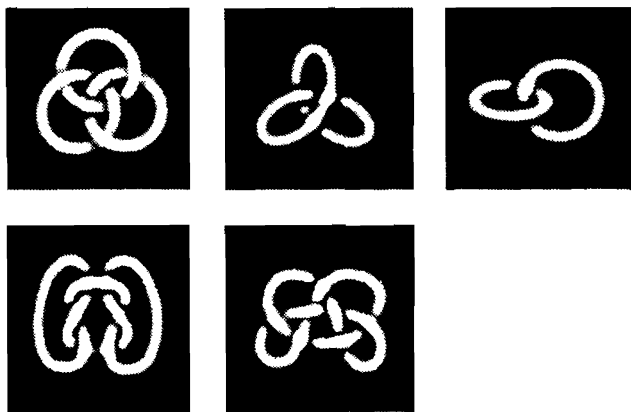
Таким образом, открытие электрона, X -лучей, лучей Беккереля, явления радиоактивности и радиоактивного превращения элементов, спектральных закономерностей и других явлений, неумолимо приводили к вы-

воду, что атом не является неделимым, что он как-то устроен. Между прочим еще немецкий математик и философ Готфрид Лейбниц (*G. Leibniz*, 1646–1716) прозорливо отмечал: *«Нет последнего мельчайшего тела, ... частичка материи как бы мала она ни была, есть целый мир, полный бесконечного множества творений, еще более мелких».*

1.9. МОДЕЛИ АТОМА

Считается, что идею о сложном строении атома впервые высказал английский врач Уильям Праут (*W. Prout*, 1785–1850) еще в 1815 году. Он предположил, что все атомы состоят из атомов водорода, количество которых определяется атомным весом. Затем английский астрофизик Локьер в 1879 году заметил, что линейчатые спектры элементов в одних случаях оказываются достаточно простыми, в других — более сложными. Это он объяснял как свидетельство того, *«что сами элементы или, во всяком случае, некоторые из них представляют собой сложные тела».* В начале XX века существовали разные и порой фантастические представления о строении атома — атомные модели. Например, по теории «вихревого атома» лорда Кельвина (*Уильяма Томсона*) (*W. Thomson*, 1824–1907) атом устроен подобно кольцам дыма, выпускаемым изо рта опытным курильщиком. По этому поводу Кирхгоф говорил: *«Это прекрасная теория, потому что она исключает любую другую».*

Некоторые верили, что «атом кислорода имеет форму кольца, а атом серы — форму лепешки», и т. д. Но были и другие представления. Жан Перрен в 1901 году рассматривал *«нуклеарно-планетарную структуру атома».* Он считал, что в центре атома находится положительно заряженная частица, которая окружена некоторым количеством электронов, ком-



Вихревые атомы Кельвина

пенсирующих положительный заряд. Предполагалось, что эта система зарядов под действием внутренних электромагнитных сил является динамически стабильной, при этом периоды обращения системы связывались с соответствующими частотами (длинами волн) спектра излучающего атома. Аналогичные соображения высказывал в 1904 году японский физик Нагаока (Н. Nagaoka, 1865–1950), предложивший так называемую «сапурнианскую» модель атома. Он считал, что центральная положительно заряженная частица окружена электронами, находящимися на равных расстояниях друг от друга и вращающимися с одинаковой угловой скоростью. При этом возникновение линий излучения атома связывалось с малыми поперечными колебаниями электронов.

В 1908 году французский физик и математик Анри Пуанкаре (H. Poincaré, 1854–1912) писал:

«Все опыты над проводимостью газов... дают нам основание рассматривать атом как состоящий из положительно заряженного центра и, по массе равному приблизительно самому атому, причем вокруг этого центра вращаются, тяготея к нему электроны». Таким образом, представления о планетарном строении атома были довольно распространены в начале XX века и о них даже писали в учебниках. Например, в учебнике по электричеству профессор Парижского университета Пелла в 1907 году писал: *«...Атом не является неделимой частичкой материи. Испускание света, дающего спектральные линии, характерные для каждого рода атомов, указывает уже на разнородность атомов. Можно было бы предположить, что атом состоит из очень большого числа корпускул, которые притягиваются к какому-нибудь центру, как планеты притягиваются к Солнцу. Чтобы атом был нейтрален, необходимо, чтобы положительный электрический заряд, который, как мы предположили, находится в центре атома, был равен по абсолютному значению сумме отрицательных зарядов корпускул, вращающихся вокруг него...»*⁸ Однако все эти соображения не были подкреплены экспериментом и носили умозрительный характер. В 1903 году Дж. Дж. Томсон, развивая идеи Кельвина, предложил «капельную» модель атома, или модель «пудинга», которая широко использовалась в свое время. Согласно этой модели атом рассматривался как «сфера однородной положительной электризации», внутри которой вкраплено (как изюминки в пудинге) определенное количество электронов, нейтрализующих положительный заряд атома. Испускание света атомом рассматривалось как результат квазиупругих колебаний электронов около их предполагаемых положений равновесия. Однако это, естественно, не могло объяснить наблюдаемые спек-



Пуанкаре

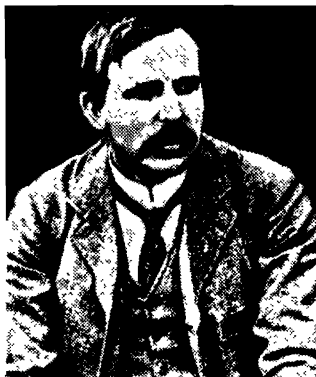
тры атомов. Кроме того, было совершенно непонятно, как при непрерывно распределенном положительном заряде в атоме могут возникать α -частицы с дискретным зарядом. Вместе с тем с помощью этой модели в свое время были получены оценки рассеяния рентгеновского излучения, поглощения катодных лучей, дисперсии света, отклонения быстрых заряженных частиц при их прохождении через вещество.

Первые опыты по изучению строения атома проводил немецкий физик Филипп Ленард (*P. Lenard*, 1862–1947) в 1903 году с помощью катодных лучей — пучка электронов. Если бы атомы представляли собой массивные непроницаемые шарики, то в результате столкновений с ними электроны очень скоро бы остановились. Однако опыты Ленарда показали, что быстрые электроны почти не тормозятся атомами. Отсюда можно было сделать вывод, что внутри атома имеется «пустое» пространство. Предложенная Ленардом «динамидная» теория атома оказалась также неудовлетворительной. Лишь Резерфорду в 1911 году удалось сформулировать и экспериментально обосновать модель атома, которую называют *ядерной*, или планетарной. Разрешение трудностей этой модели привело затем к современным представлениям о строении атома.

1.10. ИМЕЕТ ЛИ АТОМ ПЛАНЕТАРНОЕ СТРОЕНИЕ?

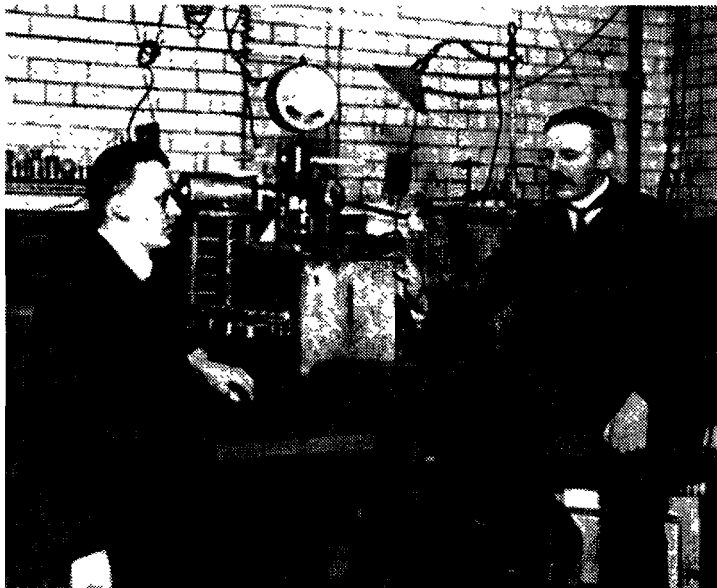
Эрнест Резерфорд (E. Rutherford, 1871–1937), уроженец Новой Зеландии, с 1895 по 1898 год проработал в Кавендишской лаборатории у Дж. Дж. Томсона, а затем переехал в Канаду. Там он начал изучение радиоактивных превращений. Эти исследования Резерфорд продолжил в Манчестере, в университете Виктории. Там же он поставил свои знаменитые опыты по строению атома. В 1919 году он стал директором знаменитой Кавендишской лаборатории, созданной в 1871 году великим физиком Максвеллом. В 1914 году он высказал идею об искусственном превращении атомных ядер. Совместно с Эдвардом Андраде (E. Andrade, 1887–1971) доказал идентичность рентгеновских спектров изотопов. Этим было окончательно подтверждено равенство порядковых номеров у изотопов данного элемента. В 1919 году он осуществил первую искусственную ядерную реакцию, превратив азот в кислород. Этим были заложены основы современной физики атомного ядра. Совместно с Маркусом Олифантом (M. Oliphant, 1901) он экспериментально доказал справедливость закона взаимосвязи массы и энергии в ядерных реакциях (1933) и осуществил реакцию синтеза дейтронов с образованием трития (1934). За исследования по превращению элементов и химии радиоактивных веществ в 1908 году Резерфорд был удостоен Нобелевской премии по химии. Он создал блестящую школу физиков, из которой вышли многие знаменитые ученые.

Схема первоначальных опытов Резерфорда, которые он начал в 1906 году, была очень проста. От радиоактивного источника α -частицы



Резерфорд

проходили через узкое отверстие, затем попадали на фотопластинку, на которой регистрировалось четкое изображение щели. Резерфорд заметил, что когда в стеклянной вакуумной установке, в которой проводился эксперимент, находится воздух или какой-нибудь газ, то изображение щели становится размытым. На первый взгляд это легко объяснить: быстрые α -частицы при взаимодействии с атомами газа немного отклоняются от своего первоначального направления движения, то есть, как говорят, рассеиваются, так что из-за этого изображение становится размытым. Однако трудно согласиться с таким объяснением. Дело в том, что α -частицы обладают большой массой (они примерно в 7360 раз тяжелее электронов) и движутся с большой скоростью — около 20 км/с. Поэтому даже небольшое отклонение быстрых массивных частиц означает, что в атоме существуют значительные силы, вызывающие их отклонение. Чтобы объяснить отклонение α -частиц в среднем всего на 2° , необходимо допустить, что в атомах имеются огромные электрические поля с напряженностью свыше 200 кВ/см. Было неясно, откуда берутся поля с такой напряженностью. Дальнейшие опыты продолжили под руководством Резерфорда его ученики Ганс Гейгер (*H. Geiger*, 1882–1945) и Эрнест Марсден (*E. Marsden*, 1889–1970). Они изучали рассеяние α -частиц очень тонкими пластинками — фольгами толщиной около 0,01 мм из золота, платины и других материалов. Столь тонкие фольги укреплялись на стеклянной пластинке, которая сама по себе была прозрачной для α -частиц, т. е. не вызывала их отклонения. Отклонение α -частиц на определенный угол от первоначального направления движения регистрировалось спинтарископом, и с помощью микроскопа в совершенно темной комнате визуально подсчитывались вспышки — сцинтилляции от попадания рассеянных частиц на экран. Это была изнурительная работа для глаз. Понимая это, Резерфорд с восхищением и благодарностью называл Гейгера и Марсдена «демонами счета сцинтилляций». Они подсчитывали процент частиц, отклоненных на разные углы.



Гейгер и Резерфорд

Позднее Марсден вспоминал, как однажды Резерфорд сказал: *«Посмотрите, не могли бы Вы увидеть эффект от α -частиц, прямо отраженных от металлической поверхности»*. Свое мнение об этом Марсден выразил так: *«Я не думал, что он ожидал именно такой результат, скорее всего это было одним из тех предчувствий, что какой-то эффект возможно было бы наблюдать»*.

Выполненные в 1909 году опыты показали, что большинство α -частиц отклоняется на очень малые углы, небольшая их часть отклоняется на 90° от первоначального направления, и есть ничтожно малая доля частиц, которые отражаются назад, т. е. рикошетят. В опытах с платиновой фольгой было найдено, что лишь одна из восьми тысяч частиц испытывает отражение. Такой результат сильно потряс Резерфорда. Он писал в то время: *«Гейгер и Марсден наблюдали удивительный факт, что одна из восьми тысяч α -частиц, падающих на тяжелый металл типа золота, так отклоняется столкновениями с молекулами, что она возникает снова со стороны падения. Такой результат заставляет думать, что вокруг атома или внутри него имеется колоссальное электрическое поле»*. В то время были распространены представления Томсона, согласно которым рассеяние частиц на большой угол является результатом их малых последовательных отклонений при столкновениях с атомами.

Однако опыты с очень тонкими фольгами неумолимо показывали, что большие отклонения α -частиц происходят при их однократном столкнове-

нии с атомами фольги. Впоследствии Резерфорд вспоминал: «Помню... ко мне пришел весьма возбужденный Гейгер и сказал: „Нам удалось наблюдать α -частицы, возвращающиеся назад“... Это было почти столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он бы вернулся назад и угодил в Вас».

После долгих раздумий Резерфорд пришел к выводу: «Поскольку масса, импульс и кинетическая энергия α -частицы очень велики по сравнению с соответствующими величинами для электрона, представляется невозможным, чтобы α -частица могла отклониться на большой угол при сближении с электроном. По-видимому, проще всего предположить, что атом содержит центральный заряд, распределенный в очень малом объеме».

Основываясь на представлении о том, что положительный заряд атома сосредоточен в малом его объеме, Резерфорд в 1911 году разработал теорию рассеяния α -частиц, которая была изложена в его классической статье «Рассеяние α - и β -частиц веществом и структура атома» (Phil. Mag. 21, p. 669, 1911). В этой статье выведена знаменитая формула Резерфорда и показано, что рассеяние α -частиц на большие углы является следствием однократного соударения каждой частицы с зарядом атома, сконцентрированным в его центре. Позднее, в 1912 году центральный заряд атома Резерфорд назвал *ядром*.

Теория Резерфорда была тщательно проверена в опытах Гейгера и Марсдена в 1913 году (H. Geiger, E. Marsden. Phil. Mag. 25(148), p. 604–623, 1913). Схема их эксперимента изображена на рисунке 1.6 (вид сверху). В первую очередь опыты проводились таким образом, чтобы показать, что в соответствии с формулой Резерфорда, произведение $N \cdot \sin^4 \phi / 2$, где N — среднее число альфа-частиц, рассеянных на угол ϕ , является постоянным. В таблице, взятая из работы Гейгера и Марсдена, приведены результаты их опытов в случае золотой и серебряной фольги. Видно, что, несмотря на изменение, как числа сцинтилляций, так и величины $\sin^4 \phi / 2$ в широких пределах, произведение этих величин остается примерно постоянным. Это доказывает справедливость теории Резерфорда.

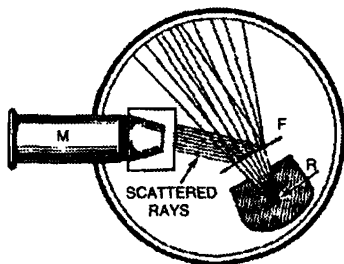


Рис. 1.6

Таблица

I. Angle of deflexion, f	II. $1/\sin^4 f / 2$	III	IV	V	VI
		SILVER.		GOLD.	
		Number of scintil- lations, N	$N \sin^4 f / 2$	Number of scintil- lations, N	$N \sin^4 f / 2$
150	1,15	22,2	19,3	33,1	28,8
135	1,38	27,4	19,8	43,0	31,2
120	1,79	33,0	18,4	51,9	29,0
105	2,53	47,3	18,7	69,5	27,5
75	7,25	136	18,8	211	29,1
60	16,0	320	20,0	477	29,8
45	46,6	989	21,2	1435	30,8
37,5	93,7	1760	18,8	3300	35,3
30	223	5260	23,6	7800	35,0
22,5	690	20 300	29,4	27 300	39,6
15	3445	105 400	30,6	132 000	38,4

Изучалась также зависимость рассеяния от толщины и материала рассеивающих пластинок и от скорости α -частиц. Во всех случаях было обнаружено согласие с выводами теории. При очень малой толщине рассеивающей пленки рассеяние оказалось прямо пропорционально этой толщине; оно оказалось обратно пропорциональным четвертой степени скорости падающих α -частиц. Специальному изучению подверглось число частиц, рассеянных на углы от 5 до 150°.

Оценивая эту работу, Резерфорд в том же 1913 году писал: «Это была весьма трудная и кропотливая работа, так как нужно было сосчитать много тысяч частиц... Экспериментальные результаты Гейгера и Марсдена оказались в полном согласии с предсказаниями теории и указали на то, что сделанная мною гипотеза о строении атома в существенных чертах правильна» (Э. Резерфорд. Избр. труды. М.: Наука, 1972, с. 238).

Помимо экспериментального подтверждения существования ядра у атома, результаты Гейгера и Марсдена означали также, что закон Кулона, положенный в основу представлений о взаимодействии α -частиц с ядром, оказывается справедливым на атомных расстояниях. Хотя в этом промежутке число рассеянных частиц уменьшается в отношении 200 000:1, связь между этим числом и углом согласовывалась с теорией в пределах ошибок эксперимента. Гейгер и Марсден нашли, что рассеяние различными атомами вещества приблизительно пропорционально квадрату атомной массы, откуда следует, что заряд ядра приблизительно пропорционален атомной

массе. Определяя число α -частиц, рассеянных тонкими пленками золота, они заключили, что ядерный заряд приблизительно равен половине атомной массы, помноженной на заряд электрона. Вследствие трудности опыта действительное число можно было определить лишь с погрешностью, не превышающей 20 %.

Итак, опытами Резерфорда и его сотрудников было установлено существование положительного ядра у атома. Это ядро имеет размеры около 10^{-12} см, что намного меньше размеров самого атома — порядка 10^{-8} см.

После создания в 1912 году камеры Вильсона (*Ch. Wilson, 1869–1959*) картина рассеяния альфа-частиц стала совершенно наглядной (рис. 1.7). Такая картина трэков частиц подтверждает идеи Резерфорда о существовании ядер атомов.

В 1913 году нидерландский юрист и физик Антониус Ван ден Брук (*Van den Broek, 1870–1926*) заметил, что данные по рассеянию α -частиц хорошо объясняются, если считать, что заряд ядра равен порядковому номеру элемента. В том же году ученик Резерфорда Генри Мозли (*H. Moseley, 1887–1915*), исследуя спектры рентгеновского излучения различных элементов, установил, что число положительных зарядов, содержащихся в ядре, в точности равно порядковому номеру Z данного элемента в периодической системе Д. И. Менделеева (1834–1907). Поскольку атом в целом электрически нейтрален, то отрицательный заряд электронов должен компенсировать положительный заряд ядра, так что в атоме должно быть Z электронов. Окончательный вывод о том, что заряд ядра равен порядковому номеру элемента, был сделан в 1920 году на основании опытов английского физика Джеймса Чэдваика (*J. Chadwick, 1891–1974*) и теории Резерфорда по рассеянию альфа — частиц ядрами платины, серебра и меди.

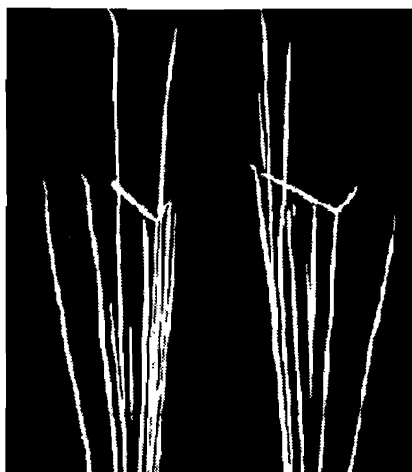


Рис. 1.7

Используя этот факт, теперь можно точно сказать, что такое элемент: элемент — это вещество, состоящее из атомов с одинаковым зарядом ядра.

На основании проведенных опытов Резерфорд в 1911 году пришел к выводу, что строение атома похоже на Солнечную систему. Ядро является как бы Солнцем, а электроны — планетами. По этому поводу Гейгер вспоминал впоследствии: *«Однажды Резерфорд, очевидно, в прекрасном настроении зашел в мою комнату и сказал мне, что он теперь знает, как выглядит атом»*. Именно «выглядит», а «не устроен» атом. Резерфорд, конечно, понимал трудности этой модели. Дело в том, что планетарное строение атома лишь внешне является сходным с Солнечной системой и эта аналогия довольно обманчива. В противоположность планетам, связанным силами взаимного притяжения, электроны отталкиваются друг от друга. Притяжение Солнцем внешних планет усиливается притяжением внутренних планет, тогда как в атоме внутренние электроны ослабляют воздействие ядра на внешние электроны — экранируют его заряд. Планеты сильно отличаются друг от друга по многим своим свойствам, а все электроны имеют одну и ту же массу и заряд и являются неразличимыми, тождественными частицами. К тому же в отличие, например, от томсоновской модели атома планетарная модель не дает возможности оценить размер атома, который к тому времени был известен из молекулярно-кинетической теории. Но самый главный недостаток идеи о планетарном строении атома заключается в следующем: система, состоящая из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него электронов, с точки зрения классической электродинамики Максвелла—Лоренца является неустойчивой и, следовательно, не может существовать. В самом деле, по законам электродинамики ускоренно движущийся заряд должен терять свою энергию на излучение, а электрон, вращающийся вокруг ядра, движется с ускорением. Поскольку энергия вращающегося электрона связана с радиусом его орбиты, то с уменьшением энергии из-за излучения уменьшается также радиус орбиты электрона. Процесс излучения происходит непрерывно, и электрон, в конце концов, должен «упасть» на положительный центр притяжения. По мере приближения к ядру электрон должен был бы вращаться все быстрее и быстрее с повышением частоты испускаемого им света. Между тем наблюдается совсем другое: если атом испускает свет, то этот свет характеризуется одной частотой. По этому поводу известный физик Пауль Эренфест (*P. Ehrenfest*, 1880–1933) остроумно заметил: *«Вопрос заключается в следующем: почему атом испускает чистый тон, а не шум, подобный мяуканью кота?»*.

Как впервые рассчитал немецкий ученый Шотт (*G. A. Schott*) еще в 1904 году, падение электрона на ядро должно произойти практически мгновенно, за время порядка 10^{-11} с. Однако хорошо известно, что атом обладает чрезвычайной устойчивостью и не изменяется в химических реакциях.

Таким образом, эксперименты Резерфорда создали тупиковую ситуацию. Надо было отказываться либо от электродинамики, либо от плане-

тарной модели. Большинство физиков того времени считало, что не следует отказываться от электродинамики, которая подтверждена многочисленными экспериментами и нашла практические применения. Поэтому на первом Сольвеевском конгрессе в 1911 году, на котором присутствовали выдающиеся физики — Эйнштейн, Планк, Кюри, Ланжевен и др., и который был посвящен проблеме квантов и излучения, никто даже не упомянул об идее Резерфорда. Об атмосфере же, царившей в то время в лаборатории Резерфорда, Нильс Бор говорил в 1926 году: *«Весной 1912 года во время моего первого визита в Манчестер, вся лаборатория была взволнована одним из самых крупных открытий, которое в полной мере явилось плодом стараний Резерфорда. Сам Резерфорд и его ученики были всецело поглощены выяснением следствий, вытекавших из его нового взгляда на ядерное строение атома. Представление о том, насколько сильно мы верили в его суждения, будет неполным, если только сказать, что никто в его лаборатории не допускал и тени сомнения в правильности и фундаментальной важности этой точки зрения, хотя в то время она и очень оспаривалась»*. Несмотря на обреченность планетарной модели сэра Эрнест, прозванный впоследствии знаменитым физиком П. Л. Капицей (1894–1984) *Крокодил*ом, за то, что он, как грозный крокодил, который никогда не поворачивает назад, действительно не повернул назад и был убежден в правоте своей модели атома. Он говорил тогда: *«Вопрос об устойчивости предлагаемого атома не нуждается в рассмотрении на этом этапе, так как устойчивость, несомненно, зависит от тонкостей строения атома и от движения его заряженных составных частей»*. Выход из этого тупика нашел великий датский физик Нильс Бор. Чтобы понять, как это произошло, надо сначала познакомиться с другими открытиями в физике.

1.11. КАК БЫЛ ОТКРЫТ ПРОТОН

Многочисленные опыты по рассеянию α -частиц подтвердили представления Резерфорда о ядерном строении атома и его знаменитую формулу. Вместе с тем согласие теории с экспериментом наблюдалось только в случае рассеяния α -частиц тяжелыми элементами. Рассеяние α -частиц по разным направлениям легкими элементами оказалось отличным от того, что предсказывала теория. В этом случае говорили об *«аномальном»* рассеянии α -частиц. Объясняли это так: поскольку заряд ядра тяжелых атомов довольно большой, то силы отталкивания между ними и α -частицами очень велики. Эти силы заставляют α -частицы отклоняться от своего пути еще сравнительно далеко от ядра. В случае легких элементов, заряд ядра которых сравнительно невелик, силы отталкивания намного слабее, так что α -частицы могут близко подходить к ядру, и, возможно, даже проникать в него. Такие рассуждения привели Резерфорда к мысли о возможности расщепления атомных ядер с помощью быстрых α -частиц.

В качестве таких «снарядов», способных пробить «броню» обычных нерадиоактивных ядер, Резерфорд выбрал самые быстрые α -частицы, испускаемые радием С'. Они имеют скорость $19\ 200\ \text{км/с}$. Свои опыты, завершившиеся открытием расщепления ядра атома азота α -частицами, Резерфорд проводил в 1919 году.

Схема довольно простой и остроумной экспериментальной установки Резерфорда изображена на рис. 1.8.

Радиоактивный источник находился на маленьком диске D внутри камеры P , заполняемой исследуемым газом. Размеры этой камеры и давление газа в ней подбирались так, чтобы все α -частицы, в том числе и самые быстрые, поглотились бы внутри газа и не смогли достичь стенки камеры E . В этой стенке было сделано отверстие S , за которым помещался экран F из сернистого цинка. Для предотвращения попадания наружного воздуха в камеру, отверстие S прикрывалось тонким серебряным листком, приклеенным к стенке. Другой конец камеры закрывался крышкой C . Один из кранов A позволял соединиться с насосом, а другой — с баллоном, содержащим исследуемый газ. Свечение экрана F после попадания на него отдельных заряженных частиц наблюдалось с помощью микроскопа M . Все наблюдения велись в темноте. Опыты показали, что если камера наполнена азотом, то на экране отчетливо наблюдаются яркие сцинтилляции. Поскольку по условиям эксперимента α -частицы не могли достигать экрана, то эти сцинтилляции не могли быть ими вызваны. Дополнительные тщательные эксперименты показали, что именно в азоте при бомбардировке его α -частицами возникают какие-то другие частицы, способные пробежать в воздухе путь в 28 см. Резерфорд изучил движение этих частиц в электрическом и магнитном полях, измерил их заряд и массу и нашел, что эти частицы являются ядрами атома водорода. Так было сделано поразительное открытие — при бомбардировке азота быстрыми α -частицами из недр его ядер вылетают ядра атома водорода. По пробою

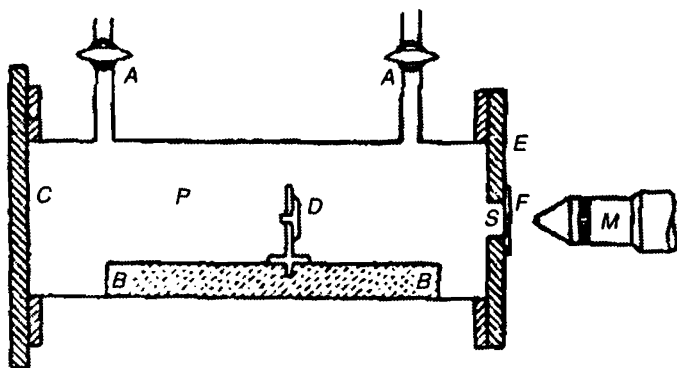


Рис. 1.8

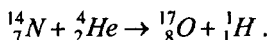
этих частиц определили их энергию, которая оказалась равной примерно 6 МэВ. Налетающие α -частицы обладали энергией около 7,7 МэВ. Таким образом, на выбивание одного ядра атома водорода из ядра атома азота тратилась энергия около 1,7 МэВ.

Подводя итог экспериментам, Резерфорд писал: «Мы должны сделать вывод, что атом азота распадается под действием громадных сил, развивающихся при близком столкновении с быстрой альфа-частицей», а возникающее при этом ядро атома водорода «образует составную часть ядра азота». Вначале ядро атома водорода предполагалось называть «бароном» (от слова «барос» — тяжелый), однако такое название не получило распространения, и был найден другой термин «протон» («протос» — первый, первичный), который сразу же был принят физиками. Выполнив большое число экспериментов, Резерфорд пришел к выводу, что протон входит в состав ядер всех атомов. Таким образом, не атом водорода, как предполагал Праут, а ядро атома водорода является составной частью всех атомов.

В 1960 году Кинг (*J. K. King. Phys. Rev. Lett. 5, p. 562, 1960*) экспериментально показал, что отношение заряда электрона к заряду протона равно -1 с фантастической точностью $e_e / e_p = -1 \pm 10^{-20}$. С той же точностью им было измерено отношение заряда ядра гелия к заряду протона, которое равно 2.

Описанные опыты Резерфорда позволяли проследить только поведение протона, а судьба α -частицы и остальной части ядра оставалась неизвестной. Эту часть драмы, связанной с бомбардировкой атомов азота α -частицами, стал изучать в 1925 году Блэккетт (*P. Blackett, 1897–1974*). Он исследовал следы («трэки») α -частиц с помощью камеры Вильсона. Это была очень трудоемкая работа, поскольку вероятность разрушения ядер α -частицами ничтожно мала. Чтобы сделать убедительные заключения о характере превращений, Блэккетт сделал свыше 20 тысяч вильсоновских фотографий. Среди этих фотографий он обнаружил только восемь, которые отображают расщепление ядра азота (рис. 1.9). На них жирный след α -частицы прерывается «вилкой»: вместо следа α -частицы возникают два других следа. Один из них принадлежит атому кислорода, а другой — протону.

Результат исследования таких картин приводит к заключению, что Резерфорд в своих опытах наблюдал не разрушение ядра атома азота, а скорее превращение этого ядра в результате проникновения в него α -частицы (ее символ ${}^4_2\text{He}$), так что азот (${}^{14}_7\text{N}$) превращается в кислород (${}^{17}_8\text{O}$), при этом испускается протон ${}^1_1\text{H}$. Этот процесс изображается в виде формулы:



Исследования Блэккетта стали наглядным и окончательным доказательством существования протона.

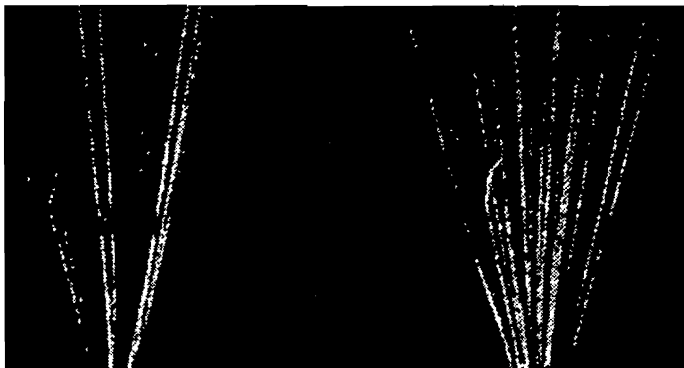


Рис. 1.9

Вскоре после открытия ядра французский физик Поль Ланжевен (*P. Langevin*, 1872–1946) отмечал, что ядерная модель атома несколько не соответствует данным о радиоактивном распаде. Он обратил внимание, что радиоактивные вещества испускают также β -лучи, которые, по всей вероятности, исходят из глубин атома. Поэтому он предположил, что в атомном ядре должны находиться также электроны. Эта точка зрения была поддержана многими физиками. В частности, Мария Кюри считала, что в атоме существуют «основные», или «ядерные» электроны, а также «периферические» электроны. Испускание «ядерных» электронов приводит к разрушению самого атома, а «периферические» электроны могут быть оторваны от атома без изменения его химической природы. Необходимость включения в состав ядра помимо протонов еще и электронов обосновывалось следующим образом. Рассмотрим, например, атом гелия. Его атомный вес равен 4, поэтому его ядро должно состоять из 4 протонов. Но в периодической системе элементов гелий занимает второе место после водорода. Это значит, что заряд ядра гелия равен 2. Для компенсации положительного заряда четырех протонов и необходимы два электрона в составе атома гелия. Аналогичные рассуждения приводили к необходимости существования электронов и в ядрах других атомов. Представления такого рода держались в физике около 20 лет, пока не был открыт *нейтрон* — частица с массой протона, но не имеющая электрического заряда.

Физики... имеют некоторые подтверждения своих представлений о том, что они стоят на прочном фундаменте фактов, а не на сыпучем песке воображаемых гипотез...

Эрнест Резерфорда

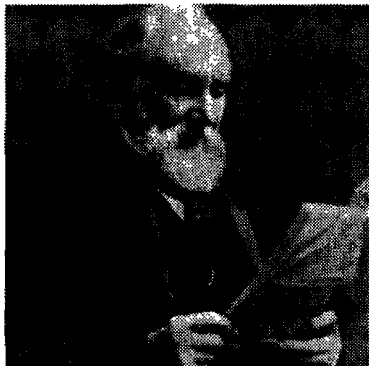
ГЛАВА 2 ✦ ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

2.1. «УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА»

На рубеже XIX и XX веков лорд Кельвин (Уильям Томсон, *W. Thomson*, 1824–1907) вдохновенно провозглашал тост за здоровье физиков XIX века, которые построили величественное здание физики, и оставили XX веку лишь возможность уточнять знаки после запятой в мировых константах, введенных в XIX веке. Вместе с тем в своей лекции, прочитанной в Королевском обществе 27 апреля 1900 года, с названием «Тучи XIX века над динамической теорией теплоты и света» он прозорливо отмечал: *«Красота и ясность динамической теории, принимающей тепло и свет за формы движения, в настоящее время затмевается двумя тучами».*

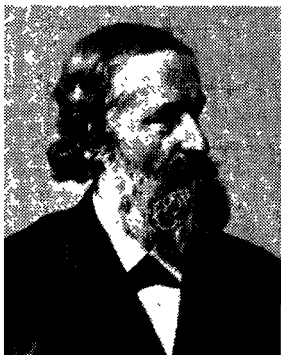
Уильям Томсон (лорд Кельвин) выдающийся английский физик, известен своими работами по электромагнетизму, гидродинамике, теплоте, технике и др. Он является одним из основателей термодинамики. Ему принадлежит одна из формулировок второго начала термодинамики (1851 г.). В 1848 году ввел абсолютную шкалу температур (шкала Кельвина).

Он открыл ряд эффектов — эффект Джоуля—Томсона, третий термодинамический эффект (эффект Томсона), выполнил расчет колебаний в электрическом контуре (формула Томсона) и т. д. В 1902 году выдвинул гипотезу о строении атома (модель Кельвина), проводил расчеты размеров молекул. Он принимал активное участие в прокладывании трансатлантического кабеля. За научные заслуги в 1892 году ему было пожаловано дворянское звание, и его стали именовать лорд Кельвин.

**Кельвин**

Первая «туча» по Кельвину связана с известными опытами Майкельсона—Морли, вторая касается противоречия между распределением энергии согласно Максвеллу—Больцману и экспериментальными данными об удельных теплоемкостях газов при учете колебательных и вращательных степеней свободы. Вторая проблема оказалась связанной с проблемой излучения черного тела. Теперь мы знаем, что из первой «тучи» в дальнейшем выросла теория относительности, а из второй — современная квантовая физика. Рассмотрим ранний этап развития второй «тучи». Ее история связана с открытием Планком универсальной физической постоянной, названной его именем. Открытие постоянной Планка явилось результатом разрешения трудностей и противоречий в объяснении опытных фактов, связанных с проблемой излучения абсолютно черного тела.

В 1859 году немецкий физик Густав Кирхгоф (*G. Kirchhoff*, 1824–1887) открыл важный закон, который сыграл большую роль в развитии представлений об излучении нагретых тел.

**Кирхгоф**

Работы Густава Роберта Кирхгофа относятся к электричеству, термодинамике, оптике, гидродинамике, математической физике. В 1845–1847 годах он установил правила для расчета разветвленных электрических цепей (правила Кирхгофа). В 1859 году совместно с Р. Бунзеном он разработал метод спектрального анализа и обнаружил обращение оптических спектров. Открыл элементы — рубидий и цезий. Объяснил происхождение фраунгоферовых линий.

Используя общие законы термодинамики, Кирхгоф показал, что в состоянии теплового равновесия, независимо от вещества и устройства тела (прибора), отношение излучательной способности нагретого тела к его поглощательной способности является универсальной функцией. Эта функция, которую называют *функцией Кирхгофа* $K(\nu, T)$, определяется только частотой излучения ν и абсолютной температурой T . Вывод закона Кирхгофа основывался на твердо установленных общих принципах термодинамики, в частности, на невозможности «перпетуум мобиле второго рода», т. е. невозможности получения энергии за счет перехода тепла от холодного тела к горячему. Как и законы термодинамики, закон Кирхгофа имеет общий характер. После установления этого закона возникла проблема нахождения функции Кирхгофа, или связанной с ней функции

$$\rho_\nu(T) = \frac{8\pi}{c} K(\nu, T). \text{ Эту функцию называют спектральной плотностью}$$

излучения. Она имеет смысл плотности энергии излучения, приходящейся на единичный интервал частоты. Если просуммировать величину ρ_ν по всем частотам, характеризующим излучение, то получится плотность энергии излучения, т. е. энергия излучения в единице объема. Излучательная способность максимальна у тех тел, которые поглощают всю падающую на них энергию. Такие тела Кирхгоф в 1860 году назвал *абсолютно черными*. Практически черное тело можно изготовить в виде полости с непрозрачными равномерно нагретыми стенками. Некоторым подобием такого типа ловушки для излучения является комната с одним окном, особенно зеркальным: если смотреть в комнату через окно, то комната кажется темной, потому что свет, проникающий через окно, почти целиком поглощается стенками и отражается стеклом и лишь небольшая его часть выходит снова наружу. Внутри полости в результате многократных испусканий и поглощений излучения при данной температуре устанавливается тепловое равновесие. Это и есть излучение черного тела. Его можно наблюдать, проделав в стенке полости небольшое отверстие. Энергия, излучаемая через это отверстие, считается равной энергии излучения черного тела при данной температуре. Измерить спектральную плотность излучения оказалось довольно трудно. Одним из первых такие измерения проводил американский физик Семюэл Ленгли (*S. Langley*, 1834–1906), который для этой цели изобрел специальный прибор — болометр. В 1886 году он по



Вин

лучил данные о распределении энергии в спектре теплового излучения зачерненных сажей источников в далекой инфракрасной области ($\lambda = 5,3 \text{ мкм}$).

В это же время немецкие физики под руководством Отто Люммера (*O. Lummer*, 1860–1925) создавали высокочувствительные приемники излучения, с помощью которых была существенно повышена точность измерений. Они разрабатывали также различные модели абсолютно черного тела. В 1893–1894 годах немецкий физик Вильгельм Вин (*W. Wien*, 1864–1928) пришел к выводу, что спектральная плотность излучения черного тела должна описываться, в общем, формулой

$$\rho_\nu(T) = \nu^3 F(\nu/T), \text{ где } F(\nu/T) \text{ — функция, конкретный вид которой в то время оставался неопределенным. Но уже из такого общего выражения следовало, что кривая распределения спектральной плотности излучения черного тела должна иметь максимум, и длина волны, которая соответствует этому максимуму, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела: } \lambda_{\text{max}} T = \text{Const} = 0,2898 \text{ см} \cdot \text{град. Так был открыт закон смещения Вина. Используя гипотезу русского физика В. А. Михельсона (1860–1927) о том, что распределение энергии излучения по частотам аналогично распределению молекул газа по скоростям, Вин в 1896 году предложил эмпирическую формулу, которая определяла спектральную плотность излучения уже в явном виде: } \rho_\lambda(T) = a\lambda^{-5} e^{-b/\lambda T}.$$

Постоянные a и b должны быть определены с помощью опытных данных.

За открытие законов излучения в 1911 году Вину была присуждена Нобелевская премия.

В 1899–1900 годах Отто Люммер, Фердинанд Курлбаум (*F. Kurlbaum*, 1857–1927), Эрнст Прингсхейм (*E. Pringsheim*, 1881–1964) и Генрих Рубенс (*H. Rubens*, 1865–1922) проводили измерения спектральной плотности энергии излучения. На рис. 2.1 показана зависимость спектральной плотности излучения от длины волны (в мкм) при разных температурах. Из экспериментов следовало, что формула Вина справедлива лишь в области коротких волн (или при достаточно низких температурах).

В 1900 году лорд Рэлей (Джон Стретт, *J. Rayleigh*, 1842–1919) на основе известного закона кинетической теории о равномерном распределении энергии по степеням свободы получил другую формулу для распределения энергии в спектре абсолютно черного тела: $\rho_\nu(T) = C\nu^2 T$, где C — некоторая величина, не зависящая от температуры. Вывод этой формулы в дальнейшем уточнил Джеймс Джинс (*J. Jeans*, 1877–1946).

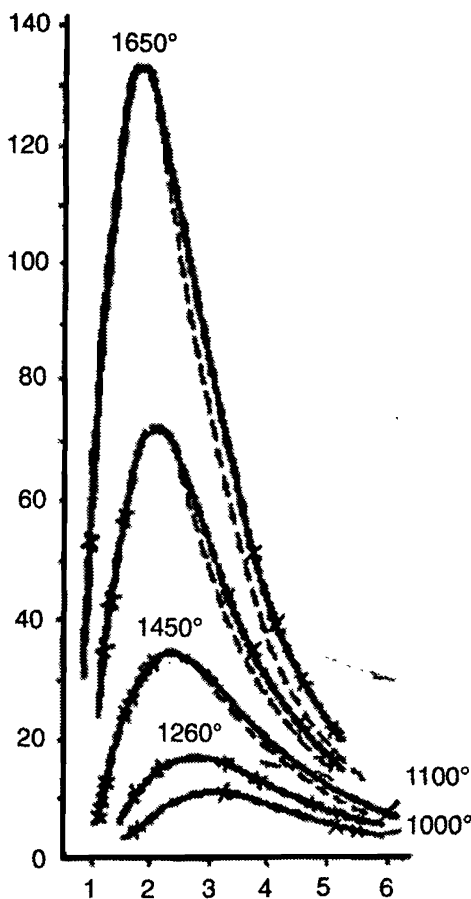


Рис. 2.1

Эксперимент показал, что в области длинных волн (или при достаточно высоких температурах) спектральная плотность излучения пропорциональна температуре, что соответствует формуле Рэля—Джинса. Эту формулу вначале пытались применить ко всей области частот (или длин волн), что явно приводило к абсурду. Действительно, суммирование по всем частотам от нуля до бесконечности приводит к тому, что плотность энергии излучения оказывается бесконечно большой, что физически бессмысленно. Из формулы Рэля—Джинса следует, что большая часть энергии в спектре теплового излучения приходится на коротковолновую, или, как говорят, на ультрафиолетовую часть, что противоречит эксперименту. Возникшее противоречие один из основоположников квантовой теории



Рэлей



Эренфест

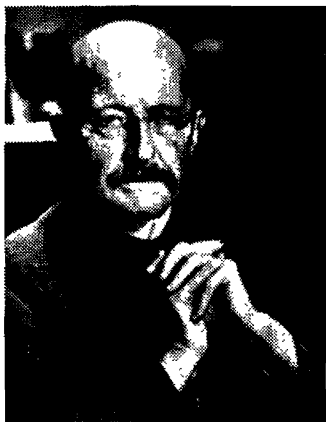
Пауль Эренфест (*P. Ehrenfest*, 1880–1933) назвал «ультрафиолетовой катастрофой», или *парадоксом Рэля—Джинса*. По этому поводу патриарх классической физики Хендрик Лоренц (*H. Lorentz*, 1853–1928) отмечал, что «уравнения классической физики оказались неспособными объяснить, почему угасшая печь не испускает желтых лучей наряду с излучением больших длин волн».

2.2. ПЛАНК ОТКРЫВАЕТ КВАНТ ДЕЙСТВИЯ

Среди многих физиков конца XIX века, пытавшихся найти выражение для спектральной функции ρ_ν (или ρ_λ), которое согласовалось бы с экспериментальными данными, был Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (*M. Planck*, 1858–1947).

Макс Планк был учеником Гельмгольца и Кирхгофа. Учился в Мюнхенском университете. При выборе профессии он колебался между античной филологией, физикой и музыкой. Профессор Мюнхенского университета Филипп фон Жолли (*von Jolly*), считая, что после установления закона сохранения энергии, других открытий не предвидится, не советовал Планку заниматься физикой. К счастью, юный Планк не последовал этому совету. Его работы относятся к теории теплового излучения, термодинамике, теории относительности, квантовой теории, истории физики. Это он ввел термин «теория относительности». Планк умер в октябре 1947 года в Геттингене.

Планку впервые удалось получить формулу, объясняющую все свойства теплового излучения черного тела. Зная недостатки формулы Вина, Планк настойчиво пытался ее улучшить. Многими годами позже он вспоминал, что знаменитая формула была найдена им в воскресенье, 7 октября 1900 года. По его словам, в этот день к нему в гости пришел его коллега физик-экспериментатор Рубенс. Во время беседы Рубенс рассказал о недавних экспериментах, из которых следовало, что для коротких длин волн интенсивность излучения достаточно хорошо описывается законом Вина, а для длинных волн интенсивность пропорциональна температуре. В тот



Планк

же вечер, по свидетельству Планка, он получил интерполяционную формулу для функции ρ_λ , которая при малых длинах волн переходила в формулу Вина, а в случае больших длин волн содержала прямую пропорциональную зависимость от температуры. Вот эта формула:
$$\rho_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}.$$

Постоянные c_1 и c_2 должны быть определены из сопоставления с опытными данными. В то время уже существовал графический метод «изохромат», который разработал Фридрих Пашен (*F. Paschen*, 1865–1947). Этот метод позволял тщательно проверять теоретические выражения для распределения энергии в спектрах нагретых тел, в частности, определять входящие в формулы константы при изменении температуры.

Свою формулу Планк представил в докладе «Об улучшении формулы Вина для спектрального распределения» на заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 года (*Verhandl. Dtsch. Phys. Ges.* 2, 202–204). *«На следующий день утром, — вспоминал впоследствии Планк, — меня разыскал мой коллега Рубенс и рассказал мне, что после закрытия заседания в ту же ночь он аккуратно сравнил мою формулу с данными его измерений, и повсюду было найдено удовлетворительное совпадение... Более поздние измерения все снова и снова подтверждали формулу для излучения и притом тем точнее, чем к более тонким методам переходили».* Планк открыл свою формулу путем гениально угаданной интерполяции.

Как потом вспоминал Планк, было это так: поскольку, по Кирхгофу, законы равновесного излучения не зависят от формы и материала полости, то он использовал модель полости, которая состоит из излучающих и поглощающих атомов, представляемых в виде осцилляторов различной частоты. Далее он применил к осцилятору первое начало термодинамики, счи-

тая объем системы постоянным: $du = Tds$. Здесь s — энтропия осциллятора, u — его энергия. Со слов Планка, большинство физиков того времени для согласования с опытными данными пытались найти функцию ρ_ν как функцию температуры, а он упорно и целенаправленно исследовал зависимость энтропии от энергии, и в этом направлении у него не было конкурентов. Как вспоминал впоследствии Планк, он «... подозревал о существовании глубокой связи между энтропией и энергией». И действительно, в 1899 году он показал, что при учете закона смещения Вина энтропия

осциллятора связана с его энергией соотношением $s = -\frac{u}{av} \ln \frac{u}{ebv}$, где a и b — постоянные, e — основание натурального логарифма. Он нашел также

формулу $\rho_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} u(\nu, T)$, где $u(\nu, T)$ — средняя энергия осциллятора частоты ν , находящегося в состоянии термодинамического равновесия с черным излучением при температуре T . Рассматривая изменение энтропии осциллятора при приращении его энергии и изменении энергии излучения, Планк нашел, что изменение энтропии определяется второй

производной $\frac{d^2s}{du^2}$, которая должна быть отрицательной. По этому поводу

он впоследствии писал: «Так как для необратимости процесса обмена энергией между некоторым осциллятором и возбужденным им излучением определяющее значение имеют производные энтропии осциллятора по его энергии, то я подсчитал значение этой величины для того случая, когда для распределения энергии справедлив закон Вина, находившийся тогда в центре внимания, и пришел к тому замечательному результату, что в этом случае обратная величина указанной производной пропорциональна энергии». Действительно, из написанных выше формул следует, что

$d^2s/du^2 = -1/avu$. Такое соотношение получается при использовании формулы Вина. Далее Планк учел экспериментальный факт, что при больших длинах волн интенсивность излучения пропорциональна температуре. Это позволило считать, что в этом случае $u = CT$, где C — некоторая величина, не зависящая от температуры. Отсюда, найдя энтропию $s = C \ln u$, легко

вычислить вторую производную энтропии $\frac{d^2s}{du^2} = -\frac{C}{u^2}$. Гениальная догадка

Планка заключалась в том, что он посчитал эти два выражения для вторых производных энтропии предельными случаями более общей формулы

$$d^2s/du^2 = -1/(avu + u^2/C) = -1/au(v + C'u).$$

Как Планк отмечал в своем докладе, «Среди всех предлагаемых выражений одно заслуживает особого внимания; оно по простоте наиболее близ-

ко формуле Вина и, поскольку последняя недостаточна для описания всех наблюдений, по-видимому, достойно внимательного рассмотрения. Это выражение получается, если воспользоваться выражением $d^2s/du^2 = \alpha/u(\beta + u)$ ». Так Планк пришел к своей интерполяционной формуле. Далее, интегрируя, Планк получил уравнение $\frac{ds}{du} = \frac{1}{T} = \alpha \ln \frac{\beta + u}{u}$, откуда сразу следует формула $u = c_1 \nu / (e^{c_2 \nu / T} - 1)$. По закону Вина $\rho_\nu = \nu^3 F(\nu/T)$, и поскольку, как показал Планк, спектральная плотность и средняя энергия осциллятора связаны соотношением $\rho_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} u(\nu, T)$, то, в общем, средняя энергия осциллятора должна определяться формулой вида $u = \nu F(\nu/T)$. Составив это выражение с ранее полученной формулой, Планк нашел, что $u = c_1 \nu / (e^{c_2 \nu / T} - 1)$. Так Планк получил приведенную выше формулу с двумя константами. В дальнейшем вместо постоянных c_1 и c_2 Планк ввел новые постоянные h и k .

Таким образом, Планк нашел удивительно точную формулу для распределения энергии в спектре черного тела. Однако он понимал, что эта формула является «лишь случайно обнаруженной интерполяционной формулой, поэтому, с самого дня ее установления передо мной, — как он писал впоследствии, — возникла задача — отыскать ее подлинный физический смысл, и эта проблема привела меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью в духе развития идей Больцмана. Именно на этом пути после нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота прояснилась, и передо мной забрезжил свет новых далей». 14 декабря 1900 года Макс Планк выступил с новым докладом в Немецком физическом обществе «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре», в котором он впервые сообщил о введенных им элементах энергии и кванте действия (Verh. d. Dtsch. Phys. Ges. 1900, 2, 237–245). Этот день справедливо считается днем рождения квантовой теории. Несколько позднее итоги своей работы Планк изложил в статье «О законе распределения энергии в нормальном спектре» (Max Planck, Annalen der Physik, 4, S. 55, 1901. Перевод этих статей: М. Планк, Избранные труды. М.: Наука, 1975).

Используя имеющиеся в то время опытные данные, Планк определил значения двух универсальных постоянных: квант действия $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг·с, которая известна как *постоянная Планка*; и $k = 1,346 \cdot 10^{-16}$ эрг/град, которую до Планка в физике не рассматривали, и которую впоследствии стали называть *постоянной Больцмана*. По этому поводу много лет спустя Планк писал: «...Эта постоянная часто обозначается как *постоянная Больцмана*, хотя сам Больцман никогда не вводил ее, насколько я знаю;

это странное обстоятельство объясняется тем, что Больцман, как это, по-видимому, следует из его случайных высказываний, совершенно не думал о возможности точного измерения этой постоянной».

Планк вычислил также число Лошмидта и заряд электрона, величины которых согласовывались с имевшимися в то время данными. Это, конечно, не могло быть случайным и свидетельствовало о справедливости квантовой гипотезы.

При малых частотах излучения (по сравнению с энергией теплового движения) из формулы Планка следует, что спектральная плотность излучения пропорциональна температуре: $\rho_\nu \approx (8\pi\nu^2 / c^3)kT$. Это полностью соответствует формуле Рэлея—Джинса. В случае высоких частот (малых длин волн) вытекает формула Вина. Тем самым «ультрафиолетовая катастрофа» устраняется. Она, собственно, возникла из-за того, что формулу Рэлея—Джинса неправомерно распространяли на всю область частот излучения. Для любых частот справедлива формула Планка, которая не содержит в себе никакого парадокса и полностью согласуется с экспериментальными данными.

Интегральная плотность излучения, вычисленная с помощью формулы Планка, оказывается конечной: $u = \int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \sigma T^4$, где постоянная

$\sigma = 1.08 \cdot 48\pi k^4 / c^3 h^3$. Это в точности соответствует известному в термодинамике закону Стефана—Больцмана.

Итак, Планк показал, что «элемент энергии» равен $\varepsilon = h\nu$, т. е. что энергия осциллятора переносится квантами — дискретными порциями $h\nu$. Это был революционный шаг в развитии физики. Как писал Анри Пуанкаре, теория Планка, согласно которой «...физические явления перестают повиноваться законам, выражаемым дифференциальными уравнениями, есть без всякого сомнения самая большая и самая глубокая революция, которую натуральная философия претерпела со времен Ньютона». Идея о квантах энергии противоречила и механике и электродинамике, но иного выхода Планк не видел. Рассматривая смысл введенной им постоянной действия, Планк пришел к выводу, что эта константа «...либо фиктивная величина, и тогда весь вывод закона излучения был в принципе ложным и представлял собой лишь пустую игру в формулы, лишённую смысла, либо же вывод закона излучения опирается на некоторую физическую реальность, и тогда квант действия должен приобрести фундаментальное значение в физике и означает собой нечто совершенно новое и неслыханное, что должно произвести переворот в нашем физическом мышлении, основывавшемся со времен Лейбница и Ньютона, открывших дифференциальное исчисление, на гипотезе непрерывности всех причинных соотношений... Я сразу же стал пытаться каким-либо образом ввести квант дей-

ствия в рамки классической теории. Но эта величина упорно и настойчиво сопротивлялась всем подобным попыткам. Пока мы имели право рассматривать ее как бесконечно малую, т. е. при сравнительно больших энергиях и долгих периодах времени, все было в полном порядке. Но в общем случае то тут, то там появлялась трещина, тем более явственная, чем более быстрые колебания мы рассматривали». Новую фундаментальную константу физики Планк называл «таинственным посланцем из реального мира».

Для объяснения механизма распространения «элементов» или «единиц энергии», как их тогда называли, были возможны два варианта: эти элементы энергии после излучения сохраняют свою индивидуальность при распространении, или каждый излучаемый элемент рассеивается в пространстве по мере удаления от источника. Первый вариант не совместим с классической оптикой, которая основана на волновом характере распространения электромагнитного излучения. Планк, несмотря на революционность своего открытия, воспитанный в духе старой, доброй классической физики, был ревностным ее хранителем, и, как многие в то время, не мог смириться с тем, что хорошо проверенная на опыте волновая теория имеет ограниченную область применимости. Поэтому вначале он считал, что процесс испускания и поглощения происходит дискретными порциями, а само излучение является непрерывным. В противоположность Планку Эйнштейн первый осознал революционный характер введенной Планком квантовой идеи и развил ее дальше. Оценивая значение открытия Планка, Эйнштейн писал: «...закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от других предположений. Более того, он убедительно показал, что, кроме атомистической структуры материи, существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной введенной Планком. Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX века и с того времени почти полностью обусловило ее развитие. Без этого открытия было бы невозможно установить настоящую теорию молекул и атомов и энергетических процессов, управляющих их превращениями. Более того, оно разрушило остов классической механики и электродинамики и поставило перед наукой задачу: найти новую познавательную основу для всей физики».

Сам Планк еще долго пытался с помощью различных гипотез объяснить распространение излучения на основе волновых представлений, и лишь под напором экспериментальных фактов он вынужден был оставить свои попытки. Оценивая свою работу в этом направлении, Планк впоследствии писал: «Мои тщетные попытки как-то ввести квант действия в классическую теорию продолжались в течение ряда лет и стоили мне немало трудов. Некоторые из моих коллег усматривали в этом своего рода трагедию. Но я был другого мнения об этом, потому что польза, которую я извлек из этого углубленного анализа, была весьма значительной. Ведь теперь я точно знал, что квант действия играет гораздо большую

роль, чем я вначале был склонен считать...», введение кванта действия «... означало разрыв с классической теорией, разрыв более радикальный, чем я первоначально предполагал». А в своей Нобелевской речи 2 июля 1920 года Планк сказал: «Когда я оглядываюсь на времена 20-летней давности, времена, когда впервые из ряда опытных фактов начали вырисовываться понятия и величина физического кванта действия, и на долгий извилистый путь, приведший в конце концов к ее открытию, то все это кажется мне теперь новой иллюстрацией к давно сказанным словам Гёте, что человек заблуждается, покуда у него есть стремления». Конечно, усилия Планка не были напрасными, и в одной из своих работ 1911 года Планк получил результат, который оказался чрезвычайно важным в физике: он показал, что при абсолютном нуле температуры средняя энергия осциллятора не обращается в нуль, а равна $h\nu/2$. Эту величину в дальнейшем назвали «нулевой энергией» осциллятора, или энергией нулевых колебаний. Развивая идеи Планка, немецкий физик Вальтер Нернст (*W. Nernst*, 1864–1941) в 1916 году предположил, что эфир может быть непрерывно заполнен «нуль-пункт энергией», соответствующей температуре абсолютного нуля.

В 1918 году за открытие кванта действия Макс Планку была присуждена Нобелевская премия по физике.

Квантовая идея Планка, как это часто бывает с революционными идеями, не сразу была воспринята его современниками. В этом отношении характерны воспоминания одного из основателей квантовой механики Макса Борна (*M. Born*, 1882–1970): «Как же были приняты эти идеи? Я позволю себе говорить о моем собственном опыте. В Геттингене, насколько я припоминаю, я ничего не слышал о квантах; также и в Кембридже, где я весной и летом 1906 года несколько месяцев слушал лекции Дж. Дж. Томсона и Лармора и прошел экспериментальный круг в Кавендишской лаборатории. Только тогда, когда я осенью 1906 года приехал в Бреслау к Люммеру и Прингсхейму, я попал в настоящую квантовую атмосферу. Ибо оба они сделали существенный вклад в экспериментальное изучение черного излучения. Но хотя в центре дискуссии стояла формула Планка, обсуждающие склонны были гипотезу Планка о квантовании энергии осциллятора рассматривать как предварительную рабочую гипотезу, а световые кванты Эйнштейна всерьез не принимали...». Аналогично, по воспоминаниям Макса фон Лауэ (*Max von Laue*, 1879–1960), он в 1902 году «... пошел на лекцию Планка по теоретической оптике. Я знал его как автора учебника по термодинамике, и мне было известно, что он много занимался оптикой. Но о его главном великом деянии — открытии в 1900 году закона излучения и квантового теоретическом обосновании его — я ничего не знал; это были тогда еще не признанные и потому мало известные исследования». И Лоренц в своей книге «Теория электронов», вышедшей в 1909 году, писал о квантах: «В этой теории, несомненно, заключается

значительная доля истины. Конечно, она ни в коей мере не послужила для того, чтобы раскрыть механизм явлений; следует также признать, что весьма трудно найти оправдание такого представления о распределении энергии порциями конечной величины, которые даже не равны друг другу». А в первом издании в 1904 году книги Джинса «Динамическая теория газов» закон Планка даже не упоминался. Более того, в то время среди экспериментаторов развернулась взаимная критика точности результатов измерений и согласования их с формулой Планка. Однако вскоре было признано полное соответствие между экспериментальными результатами и формулой Планка.

Острая дискуссия по проблемам квантов и излучения развернулась на I-ом Сольвеевском конгрессе, который происходил в Брюсселе в октябре 1911 года. В этом конгрессе участвовали все выдающиеся физики того времени.

Сольвеевские конгрессы по физике и химии были организованы по инициативе богатейшего бельгийского промышленника и известного химика Эрнеста Сольве (1838–1922). Они сыграли важную роль в развитии физики XX века. Бесменным председателем первых Сольвеевских конгрессов (1911, 1913, 1921, 1924, 1927 гг.) был Лоренц.

Хендрик Антон Лоренц (H. Lorentz, 1853–1928) на основе уравнений Максвелла—Лоренца создал классическую электронную теорию, описывающую электромагнитные и оптические свойства вещества и различные электромагнитные явления. Для объяснения известного опыта Майкельсона—Морли в 1892 году он независимо от Дж. Фитцджеральда предложил гипотезу о сокращении размеров тел в направлении их движе-



Лоренц

ния. Ввел понятие о местном времени (1895), которому, однако, не придавал реального смысла. В 1904 году он вывел знаменитые формулы преобразований Лоренца, из которых следуют все кинематические эффекты частной теории относительности. Его работы способствовали созданию квантовой теории и особенно частной теории относительности.

Выступая на конгрессе, Лоренц говорил: «...Наука далека от полного удовлетворения, которое еще двадцать лет назад могла бы дать кинематическая теория газов, мало-помалу распространенная на жидкости, разбавленные растворы и систему электронов... Мы чувствуем себя как в тупике... Лишь прекрасная гипотеза об элементах энергии, впервые предложенная Планком и примененная к многочисленным явлениям Нернстом, Эйнштейном и др., оказалась проблеском света. Она открыла нам неожиданные перспективы, даже скептики должны признать ее важность и плодотворность».

Лоренц называл излучение черного тела «самым таинственным явлением, представляющим огромные трудности для разгадки».

В своем докладе Планк представил соображения о возможности совместить волновые и квантовые стороны излучения. Он, в частности, показал, как необходимо изменить классическую статистическую механику, чтобы получить не вытекающий из нее закон Рэлея—Джинса, а открытый им квантовый закон излучения. Планк исходил из классической статистики Гиббса, согласно которой вероятность нахождения системы с энергией $H(p, q)$ в состоянии термодинамического равновесия в элементе фазового объема $dqdp$, равна $dW = \exp(-H/kT)dqdp / \int \exp(-H/kT)dqdp$. Для линейного

гармонического осциллятора энергия равна $H(q, p) = p^2/2m + 2\pi^2\nu^2mq^2$. Тогда прямым вычислением нетрудно показать, что средняя энергия осциллятора $u = \int H(q, p)dW = kT$. Это приводит к закону Рэлея—Джинса.

Если же предположить, что энергия осциллятора может принимать только дискретные значения $E_n = n\varepsilon = nh\nu$, где n — целые числа, то вместо интегрирования необходимо проводить суммирование. В этом случае сред-

няя энергия осциллятора равна $u = \frac{\sum_n E_n \exp(-E_n/kT)}{\sum_n \exp(-E_n/kT)} = \frac{\varepsilon}{\exp(\varepsilon/kT) - 1}$ в

полном согласии с прежними вычислениями Планка. Используя такие соображения, Планк интерпретировал постоянную h как площадь элементарной ячейки в фазовом пространстве:

$\int_E^{E+\varepsilon} dqdp = h$, и подвел итог:

«Можно ограничиться констатацией того факта, что элементарная об-

ласть вероятности имеет указанную конечную величину, отклоняя все дальнейшие вопросы о физическом значении этой замечательной постоянной».

Вин высказал мысль, что если испускание происходит квантами, то это поставит нас «... в противоречие с уравнениями Максвелла, даже если бы мы согласились применять их только вне электрона. Следовательно, надо было бы отказаться от уравнений Максвелла во внутриатомных явлениях». Планк же считал, что нет необходимости изменять уравнения Максвелла для вакуума: «...я утверждаю строгую действительность дифференциальных уравнений Максвелла—Герца в пустом пространстве, которые, само собой разумеется, исключают существование дискретных квантов энергии в вакууме».

Итог дискуссии подвел Пуанкаре: «Кажется, что последние исследования ставят под вопрос не только основные принципы механики, но и то, что до сих пор представлялось неотделимым от самого понятия закона природы. Сможем ли мы выразить эти законы в виде дифференциальных уравнений? С другой стороны, меня поразило в дискуссии, которую мы слышали, то, что одна и та же теория опирается то на принципы старой механики, то на новые гипотезы, являющиеся отрицанием этой механики; нельзя забывать, что нет положения, которое нельзя было бы легко доказать, если ввести в доказательство две противоречивые посылки».

Уже после конгресса в 1912 году Планк писал: «Несмотря на удовлетворительное согласие ... результатов между собой и с опытными данными, идеи, из которых они возникли, хотя и возбуждают очень большой интерес, но, насколько я могу судить, еще отнюдь не нашли себе всеобщего признания. Это связано с тем, что квантовая гипотеза до сих пор еще не достигла удовлетворительного завершения. В то время, как многие физики из консерватизма отвергают развитые мною соображения или занимают выжидательную позицию, другие авторы, напротив, считают необходимым дополнить мои соображения еще более радикальными предположениями. Так как для успешного развития новой гипотезы нет ничего вреднее, чем выход за пределы ее применимости, то я всегда стоял за то, чтобы возможно теснее связать квантовую гипотезу с классической динамикой, нарушал границы последней только тогда, когда опытные факты не дают никакого другого выхода».

Анализу логической структуры квантовой теории излучения был посвящен ряд работ Эренфеста. Он показал, что из классической статистики газокINETического ансамбля вытекает только закон Рэлея—Джинса, и, следовательно, закон Планка не совместим с этой статистикой. С другой стороны, российский физик-теоретик Ю. А. Крутков (1890—1952) в 1914 году показал, что из классической статистики световых квантов следует только формула излучения Вина. Последовательное обоснование закона Планка стало возможным с помощью квантовой статистики Бозе—Эйнштейна, развитой в 1924 году.

2.3. ГИПОТЕЗА СВЕТОВЫХ КВАНТОВ

В 1905 году Эйнштейн в своей работе «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» (Ann. Phys. 17, 132, 1905; — Собрание научных трудов, М.: Наука, т. III, 1966, с. 92) высказал мысль о том, что «элементы энергии» обладают особой индивидуальностью, и ввел гипотезу световых квантов.

Великий физик Альберт Эйнштейн родился 14 марта 1879 года в Германии, в г. Ульме. В 1900 году он закончил политехнический институт в Цюрихе. Преподаватели института не отмечали у него особых способностей, поэтому он не был оставлен в институте для подготовки к профессорской деятельности. Вначале он вел частную преподавательскую работу, которая плохо обеспечивала его. В 1902 году он был принят в бюро патентов в Берне. Здесь он создал и опубликовал в 1905 году целый ряд выдающихся работ по физике. Эйнштейн является одним из создателей современной физики. Им созданы частная и общая теория относительности. Огромен его вклад в квантовую теорию. Он был не только великим ученым, стоящим в одном ряду с Галилеем и Ньютоном, но мудрым и гуманным человеком. С 1933 года до конца своей жизни в 1955 году Эйнштейн жил в Принстоне, США.

В своей работе Эйнштейн писал: «Я и в самом деле думаю, что опыты, касающиеся „излучения черного тела“, фотолуминесценции, возникновения катодных лучей при освещении ультрафиолетовыми лучами и других групп явлений, связанных с возникновением и превращением света, лучше объясняются предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно... Энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве



Эйнштейн

неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком... Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не оперегают теорию излучения Планка; напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов».

Чтобы прийти к такому выводу, Эйнштейн рассмотрел энтропию S черного излучения, занимающего объем V : $S = V \int_0^{\infty} \varphi_\nu(\rho_\nu) d\nu$, где $\varphi_\nu d\nu$ — энтропия, $\rho_\nu d\nu$ — энергия в единице объема излучения в интервале частот $(\nu, \nu + d\nu)$. Поскольку энтропия черного излучения максимальна при заданной энергии (и постоянном объеме), то $\delta \int_0^{\infty} \varphi_\nu(\rho_\nu) d\nu = 0$, при условии,

что $\delta \int_0^{\infty} \rho_\nu d\nu = 0$. Вводя неопределенный множитель Лагранжа λ , эти со-

отношения можно записать в виде: $\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \rho_\nu} - \lambda \right) \delta \rho_\nu d\nu = 0$. Поскольку $\delta \rho_\nu$

произвольно, то отсюда следует, что производная $\partial \varphi_\nu / \partial \rho_\nu = \lambda$ не зависит от частоты. Далее Эйнштейн вычисляет приращение энтропии dS при постоянном объеме, когда температура обратимым образом изменилась на dT :

$$dS = V \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \rho_\nu} d\rho_\nu \right) d\nu = \frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \rho_\nu} d \left(V \int_0^{\infty} \rho_\nu d\nu \right) = \frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \rho_\nu} dE, \text{ где } E = V \int_0^{\infty} \rho_\nu d\nu.$$

Так как процесс является обратимым, и объем постоянен, то $dE = TdS$. Отсюда и из предыдущего равенства следует: $\partial \varphi_\nu / \partial \rho_\nu = 1/T$. Определяя $1/T$ из закона Вина, можно найти соотношение: $\partial \varphi_\nu / \partial \rho_\nu = -(1/b\nu) \ln(\rho_\nu / a\nu^3)$. Отсюда после интегрирования с учетом условия $\varphi_\nu = 0$ при $\rho_\nu = 0$, следует: $\varphi_\nu(\rho_\nu) = -(\rho_\nu / b\nu) [\ln(\rho_\nu / a\nu^3) - 1]$. Энергия излучения E_ν в единичном интервале частоты в объеме V равна $E_\nu = V \rho_\nu$.

Энтропия этого излучения $S_\nu = V \varphi_\nu(\rho_\nu) = -(E_\nu / b\nu) [\ln(E_\nu / aV\nu^3) - 1]$. Энтропия равновесного излучения той же энергии в другом объеме V_0 равна $S_\nu^0 = V_0 \varphi_\nu(\rho_\nu) = -(E_\nu / b\nu) [\ln(E_\nu / aV_0\nu^3) - 1]$. Таким образом, разность энтропий равна $S_\nu - S_\nu^0 = k \ln(V/V_0)^{E_\nu/h\nu}$. Здесь постоянная b согласно Планку заменена на h/k . По Больцману, разность энтропий состояний 1 и 2

пропорциональна натуральному логарифму отношения числа комплексов этих состояний, т. е. логарифму относительной вероятности состояния 1 к состоянию 2. Из последнего соотношения вытекает, что эта вероятность равна $(V/V_0)^{E_\nu/h\nu}$.

Далее рассматривается идеальный газ, состоящий из N молекул в объеме V_0 . Нетрудно определить вероятность того, что все эти N молекул в некоторый момент времени случайно соберутся в объеме $V < V_0$. В силу независимости движения молекул эта вероятность равна $(V/V_0)^N$.

Сравнивая эти два выражения для вероятностей, Эйнштейн пришел к выводу: *«Монохроматическое излучение малой плотности в пределах области применимости закона излучения Вина в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной $h\nu$ »*. И далее, *«Напрашивается вопрос, не является ли закон возникновения и превращения света таким, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии?»*.

Эйнштейн подверг критике вывод Планка своей знаменитой формулы (A. Einstein, Annalen der Physik. 20, S. 1, 1906; Собрание научных трудов, Т. 3. с. 128). Он показал, что этот вывод непоследователен, поскольку Планк одновременно принимал и отвергал классическую электродинамику. В самом деле, Планк, с одной стороны, использовал формулу для спек-

тральной плотности излучения $\rho_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} u(\nu, T)$, полученную им стро-

го на основе классической электродинамики, где считается, что энергия осциллятора изменяется непрерывно. С другой стороны, при статистическом рассмотрении взаимодействия между осцилляторами с разными собственными частотами Планк пришел к формуле $u = h\nu/(e^{h\nu/kT} - 1)$, при выводе которой та же энергия осциллятора рассматривалась как дискретная величина, принимающая лишь значения, кратные $h\nu$.

Не отрицая справедливости самой формулы Планка, Эйнштейн усматривал в непоследовательности ее вывода стимул для дальнейшего развития теории излучения. Глубокий анализ этой проблемы привел Эйнштейна к гипотезе о световых квантах.

Но Эйнштейн не ограничился только высказыванием гипотезы световых квантов. Прежде всего, идею о световых квантах он применил для объяснения фотоэлектрического эффекта.

Этот эффект случайно открыл Генрих Герц (H. Hertz, 1857–1894) в 1887 году. Он исследовал распространение электромагнитных волн от излучающего резонатора к приемнику. Чтобы лучше видеть проскакивающую искру в излучателе, Герц закрыл приемник экраном. Тогда обнаружилось, что искра проскакивает при меньшем напряжении между электродами.

Как оказалось, причиной этого явилось освещение экрана светом электрической дуги. В то время Герц был всецело увлечен доказательством существования электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Поэтому обнаруженный эффект его не заинтересовал. Этот эффект, названный фотоэлектрическим или просто фотоэффектом, переоткрыли в 1888 году Вильгельм Гальвакс (*W. Hallwachs*, 1859–1922), Аугусто Риги (*A. Righi*, 1850–1921) и А. Г. Столетов (1839–1896). Гальвакс показал, что при освещении ультрафиолетовым излучением металлическая пластинка заряжается положительно. Риги впервые наблюдал фотоэффект в случае диэлектриков (эбонит, сера) и предложил термин «фотоэлемент». Первый фотоэлемент создал и применил его на практике Столетов. Он же открыл один из законов фотоэффекта — прямую пропорциональность силы фототока от интенсивности падающего света, и обнаружил фототок насыщения. В 1899 году Дж. Дж. Томсон и Ленард определили удельный заряд частиц, вылетающих с поверхности освещаемого тела. Он оказался таким же, как для катодных лучей. Так было доказано, что с освещаемой поверхности вылетают электроны. В 1902 году Ленард установил, что энергия вылетающих электронов совершенно не зависит от интенсивности падающего света и прямо пропорциональна его частоте. Этот факт невозможно объяснить на основе классических представлений. Действительно, по классическим представлениям электрон в световом поле совершает колебания, амплитуда которых должна возрастать с увеличением интенсивности волны. Тогда, естественно, должно расти количество электронов, способных вырваться с поверхности тела. Этого, однако, не наблюдается.

Используя гипотезу о световых квантах, Эйнштейн в восьмом параграфе той же своей статьи 1905 года получил уравнение энергетического баланса при фотоэффекте:

$$E_{\max} = h\nu - W,$$

где E_{\max} — максимальная энергия вылетающих электронов, W — работа выхода, т. е. энергия, необходимая для удаления электрона из вещества. Из этой формулы следует, что максимальная энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты, в согласии с результатом Ленарда, причем угол наклона прямой $E_{\max}(\nu)$ не зависит от вещества и определяется лишь постоянной Планка. Так впервые был показан универсальный характер постоянной Планка, которая, как оказалось, определяет закономерности в совершенно различных физических явлениях.

Против гипотезы Эйнштейна решительно выступил Планк. В 1911 году он писал: «Когда думаешь о полном опытным подтверждении, которое получила электродинамика Максвелла при исследовании даже самых сложных явлений интерференции, когда думаешь о необычайных трудностях, с которыми придется столкнуться всем теориям при объяснении

электрических и магнитных явлений, если они откажутся от этой электродинамики, инстинктивно испытываешь неприязнь ко всякой попытке поколебать ее фундамент. По этой причине мы и далее оставим в стороне гипотезу „световых квантов“, тем более, что эта гипотеза находится еще в зародышевом состоянии. Будем считать, что все явления, происходящие в пустоте, в точности соответствуют уравнениям Максвелла и не имеют никакого отношения к постоянной h . Такого же мнения придерживался и Нильс Бор даже в 1923 году. Он писал: «Хотя эта точка зрения имеет большое значение для понимания некоторых классов явлений, например, фотоэффекта, с позиций квантовой теории обсуждаемая гипотеза не может все же рассматриваться как удовлетворительное решение. Как известно, именно эта гипотеза приводит к непреодолимым трудностям при объяснении явлений интерференции, представляющих основное средство при исследовании свойств излучения. Во всяком случае, можно утверждать, что лежащее в основе гипотезы световых квантов положение принципиально исключает возможность осмысления понятия частоты ν , играющей главную роль в этой теории. Поэтому гипотеза световых квантов непригодна для того, чтобы дать общую картину процессов, которая могла бы включать всю совокупность явлений, рассматриваемых при применениях квантовой теории». В то время Бор насмешливо говорил: «Даже если бы Эйнштейн прислал мне радиограмму с сообщением, что отныне он владеет окончательным доказательством реальности световых частиц, даже тогда эта радиограмма сумела бы добраться до меня только с помощью электромагнитных волн, из каковых состоит излучение».

В дальнейшем, однако, гипотеза Эйнштейна о световых квантах стала рассматриваться как одно из важнейших его достижений. Например, в 1937 году К. Комптон (брат знаменитого Артура Комптона) писал, что гипотеза световых квантов это «вклад в физическую теорию, безусловно, сравнимый по важности с его более впечатляющей и более широко известной общей теорией относительности, но давший много больше полезных применений».

Подробную экспериментальную проверку уравнения Эйнштейна для фотоэффекта выполнял в 1914–1916 годах американский физик Роберт Милликен (R. Millikan, 1868–1953). Впоследствии Милликен писал: «Я потратил 10 лет моей жизни на проверку этого эйнштейновского уравнения 1905 года, и вопреки всем моим ожиданиям я вынужден был в 1915 году безоговорочно признать, что оно экспериментально подтверждено, несмотря на его несуразность, так как казалось, что оно противоречит всему, что мы знаем об интерференции света». Это еще раз говорит о том, что в то время многие физики считали гипотезу Эйнштейна чуть ли не сумасшедшей идеей.

Квантовые идеи Планка Эйнштейн применил также к расчету молекулярной теплоемкости. Еще в 1819 году французские физики Пьер Дю-

лонг (*P. L. Dulong*, 1785–1838) и Алексис Пти (*A. T. Petit*, 1791–1820) экспериментально открыли закон, носящий их имя. Он гласит так: *количество тепла, необходимое для того, чтобы температура одной грамм-молекулы любого элемента в твердом состоянии повысилась на 1С°, составляет около 6 калорий*. Затем были обнаружены отклонения от этого закона при низких температурах и в случае очень твердых кристаллов, например, алмаза. Эти отклонения долгое время не удавалось объяснить. Объяснение закона Дюлонга и Пти основывалось на классической теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Но согласно Планку в применении к излучению эта теорема несправедлива на всем интервале частот. В своей работе 1907 года «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости» (Собрание научных трудов, М.: Наука, т. III, 1966, с. 134) Эйнштейн использовал идею Планка и предположил, что квантование — это общее свойство колебательного движения. Тогда, как и электромагнитное излучение в пустоте, колебания атомов (и ионов) в кристаллах, по идее Эйнштейна, также должны квантоваться. Эйнштейн писал: «... До сих пор считали, что движение молекул подчиняется таким же законам, каким подчиняется движение тел нашего повседневного опыта..., теперь же приходится сделать предположение, что для колеблющихся с определенной частотой ионов, участвующих в обмене энергией между веществом и излучением, множество состояний, которые могут принимать эти ионы, меньше, чем для тел повседневного опыта. Мы должны при этом предполагать механизм передачи энергии таким, что энергия элементарного образования может принимать только значения 0 , $h\nu$, $2h\nu$ и так далее». Он установил, что если в кристалле есть колебание с частотой такой, что соответствующий квант энергии $h\nu$ намного превосходит энергию теплового возбуждения, то при данной температуре такое колебание не может возбуждаться. Тепловое движение распределится не по всем колебаниям кристалла, а только на их низкочастотную часть. В этой области каждое колебание получает столько энергии, сколько полагается по теореме о равномерном распределении энергии, а весь кристалл, как целое, получает энергии меньше. Этим и объясняются отклонения от закона Дюлонга и Пти. В дальнейшем теорию теплоемкости твердых тел усовершенствовали Питер Дебай (*P. Debye*, 1884–1966), Макс Борн (*M. Born*, 1882–1970) и Теодор Карман (*T. Karman*, 1881–1969). Эта теория была блестяще подтверждена в экспериментах.

Гипотезу световых квантов Эйнштейн использовал в 1916 году при исследовании равновесия между газом молекул и излучением (Собрание научных трудов, М.: Наука, т. III, 1966, с. 386, 393). Он впервые ввел вероятностные представления в теории излучения атомов и молекул с помощью коэффициентов Эйнштейна.

Рассмотрим два каких-нибудь состояния атома с энергиями E_m и E_n (при $E_m > E_n$) (рис. 2.2). Вводится вероятность спонтанного перехода в

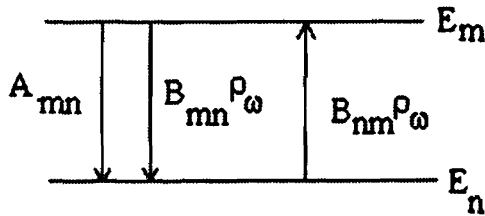


Рис. 2.2

единицу времени A_{mn} из состояния m в состояние n . Величина A_{mn} имеет смысл среднего числа актов излучения в единицу времени, приходящихся на один атом, и равна обратному времени жизни атома в возбужденном состоянии: $A_{mn} = 1/\tau_m$. Эйнштейн ввел коэффициент A_{mn} , считая, что молекула может перейти из одного состояния в другое более низкое энергетическое состояние «без возбуждения со стороны внешних причин». Бор развил эту идею, говоря, что система «будет спонтанно переходить в стационарное состояние с меньшей энергией». После Бора коэффициент A_{mn} стали называть вероятностью спонтанного излучения. Используя принцип соответствия, Бор связал коэффициент A_{mn} с коэффициентами Фу-

$$\text{рье-разложения дипольного момента } D_{mn} : A_{mn} \leftrightarrow \frac{(2\pi)^4 \nu^3}{3c^3 h} |D_{mn}|^2.$$

Если атом, находящийся в состоянии E_n , помещен во внешнее электромагнитное поле с частотой ω , то он поглощает энергию поля при совпадении этой частоты с частотой перехода $\omega_{mn} = (E_m - E_n)/\hbar$. В результате атом переходит в возбужденное состояние E_m . Пусть ρ_ω — спектральная плотность энергии электромагнитного излучения. Вводят величину $W_{nm} = B_{nm}\rho_\omega$. Этой величине придают смысл вероятности поглощения излучения атомом в единицу времени.

Наряду с процессом поглощения, в результате которого происходит переход $n \rightarrow m$, Эйнштейн предусмотрел возможность существования обратного процесса — вынужденное, стимулированное, или индуцированное испускание. Этот процесс происходит при переходе $m \rightarrow n$ под воздействием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна частоте перехода. Он характеризуется величиной $W_{mn} = B_{mn}\rho_\omega$, которая имеет смысл вероятности индуцированного излучения в единицу времени. Коэффициенты A_{mn} , B_{mn} , B_{nm} и называются коэффициентами Эйнштейна. Они связаны

$$\text{друг с другом соотношениями: } g_n B_{nm} = g_m B_{mn}, \quad A_{mn} = \frac{2\hbar\omega_{mn}^3}{\pi c^3} \frac{g_n}{g_m} B_{nm}. \text{ Ко-}$$

эффицент g_n (или g_m) называется статистическим весом, или кратностью вырождения n -го (или m -го) состояния.

Представления Эйнштейна о спонтанных и вынужденных переходах, связанных с испусканием и поглощением излучения, оказались чрезвычайно важными для дальнейшего развития теории излучения. Эти представления стали основой создания в наше время мазеров и лазеров.

Используя представления о переходах в состоянии равновесия атомов с излучением, Эйнштейн дал изящный вывод формулы Планка для спектральной плотности излучения ρ_ν . Так еще раз была подтверждена квантовая гипотеза Планка.

Однако гипотеза световых квантов Эйнштейна несмотря на успешные опыты Милликена и др. не вызывала доверия у физиков того времени. Характерен такой эпизод. Когда в 1913 году Планк, Нернст, Рубенс и Варбург выдвинули Эйнштейна в члены Прусской академии наук, они в заключение своей рекомендации писали: *«В целом можно сказать, что вряд ли найдется какая-нибудь из важных проблем современной физики, в решение которой Эйнштейн не внес бы замечательного вклада. То, что он иногда не попадает в цель, как, например, в случае гипотезы световых квантов, нельзя считать отрицательным аргументом, поскольку невозможно выдвинуть новую идею, даже в наиболее точной науке, без некоторой доли риска».*

А известный физик Чарлз Баркла (*Ch. Barkla*, 1877–1944), получая Нобелевскую премию в 1918 году за исследования свойств рентгеновского излучения, говорил, что из его опытов с рентгеновскими лучами следует, что излучение и поглощение непрерывны и что только атомы в некоторых исключительных случаях испускают свет квантами. Многие физики того времени считали, что кванты света не представляют никакой физической реальности, а являются лишь удачным эвристическим способом определения некоего количества энергии, связанного, возможно, с какой-то особенностью электромагнитного поля, т. е. квант света рассматривался лишь как некая мера, а не как своеобразная корпускула. И в 1921 году Нобелевский комитет сформулировал присуждение премии Эйнштейну *«за вклад в теоретическую физику, и особенно за открытие закона фотоэффекта»*, при этом даже не было упомянуто ни об открытии квантов электромагнитного поля, ни о создании теории относительности.

Тем не менее, по мере того, как все новые и новые явления могли быть объяснены лишь в рамках квантовых представлений, происходило медленное и постепенное признание физической реальности квантов. Отрицательное отношение физиков к гипотезе световых квантов объясняется тем, что эта гипотеза возвращала корпускулярные представления о свете. Все хорошо помнили, как после долгих лет дискуссий ньютоновские корпускулярные представления были решительно отброшены, поскольку с их помощью невозможно было объяснить ни закона преломления света, ни интерференции, ни дифракции. Между тем, световые кванты не могут иметь

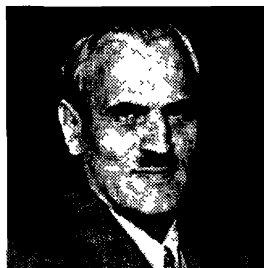
ничего общего с ньютоновскими корпускулами света. Квант света является особой частицей, распространяющейся со скоростью света в вакууме. Энергия кванта света равна $E = cp = hv$, при этом наряду с энергией квант света имеет также импульс, равный $p = hv/c$. Однако квант света оставался гипотетической частицей, пока его существование не было доказано в эксперименте.

2.4. ГИПОТЕТИЧЕСКИЙ КВАНТ СВЕТА СТАНОВИТСЯ ФОТОНОМ

В период с 1921 по 1924 год в ряде опытов было замечено, что при рассеянии рентгеновских лучей веществом возникают более «мягкие» лучи, т. е. излучение с большей длиной волны. Это противоречило теории рассеяния излучения, разработанной в 1906 году Дж. Дж. Томсоном на основе классических представлений. Согласно этой теории электромагнитное излучение, падающее на электрон, вызывает его вынужденные колебания, которые происходят с той же частотой, что и падающее излучение. Колеблющийся электрон сам оказывается источником излучения, которое называют рассеянным излучением. Говорят, что электрон рассеивает падающее на него излучение, при этом частота рассеянного излучения должна быть такой же, как и частота падающего излучения.

Американский физик Артур Комптон (*A. Compton*, 1892–1962) решил найти объяснение опытным фактам по рассеянию рентгеновского излучения. Все попытки понять их на основе классических представлений оказались безуспешными. Тогда в 1923 году, основываясь на гипотезе Эйнштейна о световых квантах, Комптон задался вопросом: «Что должно произойти, если каждый квант энергии рентгеновских лучей сконцентрирован в одной частице и действует как целое на отдельный электрон?» (*Phys. Rev.* 21(5), p. 485, 1923).

Надо сказать, что идея о корпускулярных свойствах рентгеновского излучения не была неожиданной среди некоторых экспериментаторов. Так еще в 1911 году У. Брэгг (*W. Bragg*) и Г. Портер (*H. Porter*) утверждали: «Энергетические соображения непосредственно привели нас к предполо-



Комптон

жению, что рентгеновские и гамма — лучи корпускулярны по природе, поскольку каждый луч является отдельной сущностью, движущейся через пространство без изменения в форме и содержании энергии, совершенно как двигалась бы свободная частица». В конце 1912 года Брэгг пророчески писал: «...проблема теперь состоит не в том, чтобы выбрать между двумя теориями рентгеновских лучей, а в том, чтобы найти... одну теорию, обладающую возможностями обеих».

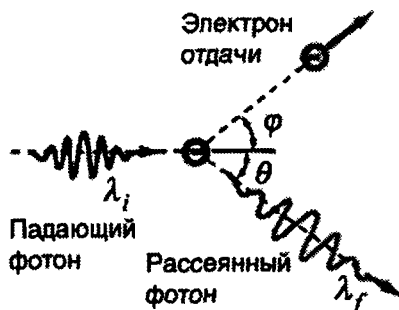


Рис. 2.3

Комптон исследовал рассеяние жесткого рентгеновского излучения средами, состоящими из легких атомов (графит, парафин). В таких средах энергия, передаваемая атому излучением, больше энергии связи электрона в атоме. Поэтому электроны можно рассматривать как «свободные», почти не связанные с атомом. В этом случае рассеяние рентгеновского излучения средой сводится к рассеянию отдельным электроном. Опыты Комптона показали, что рассеянное излучение содержит в себе в зависимости от угла рассеяния две компоненты — у одной длина волны такая же, как у падающей волны, а у другой — больше. Это явление называют *эффектом Комптона*. Комптон и Дебай показали, что объяснить этот эффект можно только на языке столкновения рентгеновского кванта со свободным электроном (рис. 2.3). Пользуясь законами сохранения энергии и импульса в системе электрон — фотон, Комптон нашел, что в результате столкновения с электроном длина волны рассеянного излучения отличается от длины волны падающего излучения на величину $\Delta\lambda \cong \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \theta / 2$.

Новая фундаментальная физическая постоянная $\lambda_c = h / m_0 c = 2,4 \cdot 10^{-10}$ см стала называться *комптоновской длиной*. Эксперименты Комптона полностью подтвердили полученную им формулу, определяющую длину волны рассеянного излучения.

Подводя итог выполненным экспериментам, Комптон писал: «Это замечательное согласие между нашими формулами почти не оставляет сомнений в том, что рассеяние рентгеновских лучей есть квантовое явление... В данной теории существенную роль играет предположение о том, что каждый электрон, эффективно участвующий в рассеянии, рассеивает целый квант. В ней также используется гипотеза о том, что кванты излучения приходят в определенных направлениях и в определенных направлениях рассеиваются. Эксперименты, подтверждающие теорию, весьма убедительно показывают, что квант излучения несет не только энергию, но и направленный импульс».

SCATTERING OF X-RAYS BY LIGHT ELEMENTS

495

the secondary. The zero point for the spectrum of both the primary and secondary X-rays was determined by finding the position of the first order lines on both sides of the zero point.

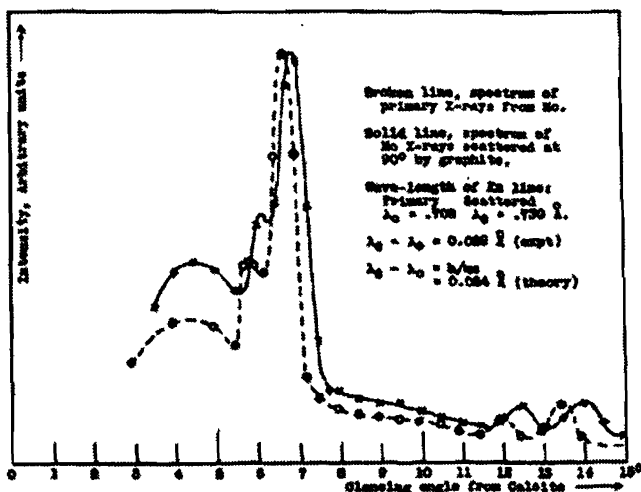


Fig. 4. Spectrum of molybdenum X-rays scattered by graphite, compared with the spectrum of the primary X-rays, showing an increase in wave-length on scattering.

It will be seen that the wave-length of the scattered rays is unquestionably greater than that of the primary rays which excite them. Thus the $K\alpha$ line from molybdenum has a wave-length 0.708 Å. The wave-length of this line in the scattered beam is found in these experiments, however, to be 0.730 Å. That is,

$$\lambda_s - \lambda_0 = 0.022 \text{ \AA} \quad (\text{experiment}).$$

But according to the present theory (Eq. 5),

$$\lambda_s - \lambda_0 = 0.0484 \sin^2 45^\circ = 0.024 \text{ \AA} \quad (\text{theory}).$$

which is a very satisfactory agreement.

The variation in wave-length of the scattered beam with the angle is illustrated in the case of γ -rays. The writer has measured¹ the mass absorption coefficient in lead of the rays scattered at different angles when various substances are traversed by the hard γ -rays from RaC. The mean results for iron, aluminium and paraffin are given in column 2 of Table I. This variation in absorption coefficient corresponds to a

¹ A. H. Compton, *Phil. Mag.* 41, 760 (1921).

Надо сказать, что идея об импульсе, передаваемом атому при излучении или поглощении света, была предложена Эйнштейном еще в 1916 году в работе «К квантовой теории излучения». Введя чрезвычайно важные представления о спонтанных и вынужденных переходах между квантовыми состояниями атомов и молекул, он писал: «... самым важным, на мой взгляд, является вывод, касающийся импульса, который передается молекуле при спонтанном и индуцированном излучениях... Если пучок воздействует на встретившуюся ему молекулу так, что она посредством элементарного процесса получает или отдает в форме излучения некоторое количество энергии $h\nu$ (индуцированное излучение), то молекула всегда будет получать и импульс $h\nu/c$: при поглощении энергии — в направлении распространения пучка, а при испускании — в противоположном направлении... Если молекула теряет энергию без внешнего возбуждения (спонтанное излучение), то этот процесс тоже является направленным. Спонтанного излучения в виде сферических волн не существует. В элементарном процессе спонтанного излучения молекула получает импульс отдачи, величина которого равна $h\nu/c$, а направление определяется, согласно современному состоянию теории, лишь „случайностью“» Поэтому Эйнштейн с удовлетворением встретил сообщение об опыте Комптона. Он писал: «Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул не только в смысле передачи энергии, но и передачи импульса». Таким образом, Комптон экспериментально доказал существование квантов света. Значение этого открытия в физике было огромным. Как отмечал известный немецкий физик-теоретик Фридрих Хунд (F. Hund, 1896–1997) в своей книге «История квантовой теории», «... Бор относился к гипотезе световых квантов до 1922 года сдержанно. Такая позиция неприемлемости или равнодушия физиков изменилась после открытия Комптон-эффекта».

Эксперименты, подтвердившие гипотезу Эйнштейна о световых квантах, проводили также российские физики А. Ф. Иоффе (1880–1960) и Н. И. Добронравов в 1924 году. В 1926 году американский физико — химик Гильберт Льюис (G. N. Lewis, 1875–1946) назвал квант света фотоном.

Льюис считал понятие «квант света» неудачным, «если мы предполагаем, что он проводит лишь ничтожную долю времени своего существования как носитель энергии излучения, а все остальное время — как важный структурный элемент внутри атома... Поэтому я позволю себе предложить для этого гипотетического нового атома, который не является светом, но принимает существенное участие во всех процессах излучения, название фотон» (Lewis G. N. Nature, 118, p. 874–875, 1926).

Этот термин сразу же был принят физиками. Фотон стал полноправной элементарной частицей с нулевой массой, нулевым электрическим зарядом и спином, равным 1. По современным представлениям фотоны на-

ряду со спиновым угловым моментом характеризуются орбитальным угловым моментом (Padgett et al, Phys. Rev. Lett. 88, p. 257901, 2002).

Вместе с тем фотон — очень своеобразная частица. Фотон не является пространственно локализованным объектом и нельзя определить его положение в пространстве. Фотон движется со скоростью света, поэтому он не может находиться в состоянии покоя. Наряду с этим, как показывают многие опыты (флуктуации концентрации фотонов в световом пучке, селективный фотоэффект и др.), к отдельному фотону применимо понятие поляризации. Более того, как и для электромагнитных волн, для фотонов также наблюдается явление интерференции, причем при наличии лишь одного фотона (см. Д. Н. Клышко, УФН, 164 (11), с. 1187, 1994).

После опытов Комптона в 1924 году Нильс Бор (N. Bohr, 1885–1962), Хендрик Крамерс (H. Kramers, 1894–1952) и Джон Слэтер (J. Slater, 1900–1976), анализируя процесс взаимодействия излучения с веществом и желая спасти волновые представления, пришли к выводу, что законы сохранения энергии и импульса должны соблюдаться в природе не в каждом элементарном акте взаимодействия, а лишь в среднем, статистически. По этой теории рассеяние излучения должно происходить непрерывно, а электроны отдачи должны испускаться совершенно случайно, при этом рассеяние волн и вылет электронов отдачи между собой никак не коррелированы. Вскоре Вальтер Боте (W. Bothe, 1891–1957) и Ханс Гейгер (H. Geiger, 1882–1945) проверили эту гипотезу. Их опыты показали, что вылет примерно каждого одиннадцатого кванта излучения совпадает по времени с вылетом электрона отдачи. При чисто же случайном совпадении этих двух актов по расчету следовало ожидать их совпадения лишь в 10^{-5} случаях. Отсюда они заключили, что их опытные данные согласуются с результатами Комптона и противоречат гипотезе Бора, Крамерса и Слэтера. В это же время Комптон и Саймон (A. W. Simon) с помощью камеры Вильсона, которая позволяла определить и время и направление вылета электрона отдачи, показали, что в среднем на каждый квант рассеянного излучения приходится один электрон отдачи.

Аналогичные эксперименты с помощью более усовершенствованной аппаратуры с высокой точностью были выполнены в 1950 году. Роберт Хофштадтер и МакИнтайр (R. Hofstadter, J. A. McIntyre, Phys. Rev. 78, p. 24, 1950) убедительно показали, что «электроны отдачи и рассеянные фотоны появляются одновременно в пределах временного интервала менее $1,5 \cdot 10^{-8}$ с». Из экспериментов Кросса и Нормана Рамсея (W. G. Cross, N. F. Ramsey, Phys. Rev. 80, p. 929, 1950) следовало, что угол, под которым электроны испускаются относительно направления вылета соответствующих рассеянных фотонов, отличается от угла, задаваемого законами сохранения, не более, чем на $\pm 1^\circ$.

Другими словами, в элементарном процессе взаимодействия частиц вполне применимы законы сохранения энергии и импульса, как это и

предполагал Комптон. Эйнштейн и Вольфганг Паули (*W. Pauli*, 1900–1958) свято верили в строгое сохранение энергии и импульса, поэтому идею Бора, Крамерса и Слэтера они считали чем-то вроде крамолы в физике. В своем письме Максу Борну 24 апреля 1924 года Эйнштейн писал: *«Меня очень заинтересовала точка зрения Бора на излучение. Но я не хочу быть втянутым в отречение от строгой причинности, прежде чем для этого появятся более сильные мотивы. Мне непереносима мысль о том, что электрон может избирать по своей свободной воле время и направление, в котором он может прыгнуть. Если это действительно так, я хотел бы стать не физиком, а холодным сапожником или даже распорядителем в казино»*. А Паули красноречиво говорил: *«Я считаю величайшим счастьем то, что представление Бора, Крамерса и Слэтера было столь быстро опровергнуто благодаря превосходным экспериментам Боте и Гейгера, а также недавно опубликованным опытам Комптона. Разумеется, правильно считать, что даже если бы эти эксперименты не были поставлены, Бор перестал бы держаться за это представление. Но многие превосходные физики (как, например, Ладенбург, Ми, Борн) продолжали бы его придерживаться, и эта злосчастная статья Бора, Крамерса и Слэтера стала бы наверно тормозом прогресса теоретической физики»*.

Бор действительно вскоре осознал свою ошибку и в июле 1925 года он писал: *«...Надежда получить указанным способом общую формулировку законов квантовой теории была бы лишена оснований после доказательства связи отдельных атомарных процессов. Эта связь в соответствии с квантовой теорией света Эйнштейна навязывает нам корпускулярную картину распространения света. При таком положении вещей нужно быть готовыми к тому, что желаемое обобщение классической электродинамики потребует решительной ломки понятий, лежавших до сих пор в основе описания природы»*. Ради справедливости надо отметить, что в «статье трех» было сказано также, что *«...волновой характер распространения света, с одной стороны, и его поглощение и испускание квантами, с другой стороны, являются теми экспериментальными фактами, которые следует положить в основу любой атомной теории и для которых не следует искать каких-либо объяснений»*.

Итак, к 1925 году было твердо установлено, что в ряде физических явлений свет ведет себя как совокупность частиц с вполне определенными энергией и импульсом. С другой стороны, многочисленные эксперименты XIX века по интерференции, дифракции и поляризации света столь же убедительно показали, что свет обладает волновыми свойствами. Так возникла острая проблема *корпускулярно-волнового дуализма* света, которая, казалось, загнала физику в тупик. Выход из этого тупика был найден позднее, когда была создана современная квантовая теория. Но это уже другая история, история *«драмы идей»*, по словам Эйнштейна.

2.5. ПРЕДОПРЕДЕЛЕНО ЛИ БЫЛО ОТКРЫТИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА?

Открытие постоянной Планка, несомненно, было предопределено всем развитием физики, поскольку без нее невозможно было бы объяснить ни законов равновесного излучения, ни законов фотоэффекта, ни факта стабильности атомов и атомных закономерностей, ни многих других экспериментальных данных, которые содержали в себе как бы «тайну потерянной константы». Как говорил Планк: «...то, что сегодня нам кажется непонятным, когда-нибудь будет казаться, с более высокой точки зрения, особенно простым и гармоничным. Но прежде чем эта цель будет достигнута, проблема кванта действия не перестанет побуждать и оплодотворять мысль исследователей, и чем большие трудности представляются в ее решении, тем важнее она окажется для расширения и углубления всего нашего физического знания».

Некоторые историки физики, признавая величие открытия Планка, делают вместе с тем различные оговорки. В частности, Макс Джеммер в книге «Эволюция понятий квантовой механики» пишет: «Вызывает сожаление, что задача, с которой началось систематическое развитие квантовой теории, оказалась задачей квантования энергии гармонических электромагнитных колебаний. Не может быть никаких сомнений в том, что... потребовалось бы гораздо меньших интеллектуальных усилий, если бы развитие теории началось с не столь концептуально сложной проблемы». А Хунд в книге «История квантовой теории» обсуждает различные альтернативные пути рождения квантовых представлений, и, отмечая большой промежуток времени между открытием Планка и следующим ключевым шагом в квантовой теории — теорией Бора, приходит к выводу, что «открытие кванта действия явилось, можно сказать, преждевременными родами». Чтобы понять, насколько справедливы подобные высказывания, надо вспомнить, как именно Планк пришел к открытию кванта действия. К началу 1900 года Планк среди многих других физиков занимался актуальной задачей того времени — обобщением формулы Вина для согласования с экспериментальными данными по распределению энергии в спектре излучения черного тела. Интерполяционным путем Планку удалось найти такую формулу. Для последовательного вывода этой формулы Планк использовал модель осциллятора, которая, как известно, является вполне адекватной для описания электромагнитного излучения. Кстати сказать, для объяснения отклонений от закона Дюлонга и Пти тоже нельзя избежать этой модели. Статистический метод Больцмана при описании свойств электромагнитного излучения и привел Планка к открытию кванта действия. Одновременно Планк открыл и «тепловой квант» — постоянную Больцмана. Что касается промежутка времени в 12–13 лет, когда Бор сделал следующий революционный шаг в развитии квантовых пред-

ставлений, то надо иметь в виду, что эти представления коренным образом противоречили всей классической физике. Поэтому они с большим трудом проникали в сознание физиков. Достаточно вспомнить, что сам Планк долгие годы пытался «вписать» квант действия в рамки классической физики, а идею Эйнштейна 1905 года о квантах света категорически отвергал. Так же резко отрицательно относился к этой идее и Бор. Несмотря на прекрасное объяснение законов фотоэффекта на основе гипотезы о квантах света, и экспериментальное подтверждение уравнения Эйнштейна для фотоэффекта в опытах Милликена, эта гипотеза не признавалась долгие годы вплоть до опытов Комптона. И даже после этого Бор, Крамерс и Слэтер пытались «спасти» классические представления об излучении. Лишь после убедительных экспериментов, показавших ошибочность «работы трех», Бор, а за ним и другие физики, признали гипотезу Эйнштейна о корпускулярно-волновом дуализме света. Это еще раз показывает, что для признания в физике принципиально новых представлений необходимо время и неопровержимые экспериментальные факты. Как говорил Планк, *«Факты образуют ту Архимедову точку опоры, на которой самая увесистая теория приподнимается на своем постаменте»*. Вспоминая бурное время ломки классических понятий и представлений, Бор писал в 1955 году: *«Широта научного кругозора Эйнштейна и прямота его ума наиболее ярко проявились в том, что в те самые годы, когда он дал широчайшее обобщение классической физике, он четко осознавал тот факт, что открытие Планком универсального кванта действия накладывает определенные ограничения на такой подход. Удивительная интуиция Эйнштейна привела его к представлению о фотонах как носителях энергии и импульса в индивидуальных процессах излучения. Тем самым он нашел отправную точку для создания последовательных квантово-теоретических методов, которые позволили объяснить огромное количество экспериментальных данных, относящихся к свойствам материи, и, более того, привели к необходимости пересмотра наших основополагающих понятий»*.

Конечно, можно рассуждать, как бы возникла квантовая теория, если бы этого не сделал Планк, но открытие кванта действия именно Планком следует считать вполне закономерным. Дело в том, что до этого открытия Планк выполнил многочисленные и глубокие исследования закономерностей равновесного излучения. Как позднее рассказывал Планк, *«...мне не осталось ничего другого, как одолеть задачу с другой стороны — термодинамической, где я с самого начала чувствовал себя более твердо. Здесь мне помогли мои ранние работы по второму началу термодинамики, а именно тем, что я сразу установил отношение между энергией резонатора и его энтропией и даже не самой энтропией, но ее второй производной по энергии, ибо эта производная обладает прямым физическим значением для необратимости обмена энергией между резонатором и излучением»*. В исследованиях Планка законов равновесного излучения боль-

шую роль сыграли идеи Больцмана. Об этом с благодарностью вспоминал Планк: «...После многих испытанных разочарований мне доставило особенное удовлетворение, что Людвиг Больцман выразил свой интерес и принципиальное согласие с выбранным мною ходом мыслей в письме, которым он ответил на присылку моей работы». А Луи де Бройль в своей статье «Таинственная постоянная h — великое открытие Макса Планка» писал: «...Планк, стремившийся расширить область применения методов статистической термодинамики, развил, пользуясь тогда еще классическими непрерывными представлениями, термодинамику электромагнитного излучения и пытался ввести наряду с энергией излучения также и его энтропию. Будучи большим поклонником прославленного Больцмана, Планк сообщил о своей работе основателю статистической механики, представляя последнюю на его суд... Больцман ответил ему, что он не сможет построить вполне правильную теорию статистической термодинамики излучения без введения в процессы излучения ранее неизвестного элемента дискретности. Когда исследуешь, как Планк пришел довольно окольным путем от термодинамики излучения абсолютно черного тела к осознанию необходимости введения совершенно нового понятия кванта действия, становится ясным, что заключение Больцмана помогло ему найти правильный путь к своему великому открытию».

Лоренц, высоко оценивая открытия Планка, отмечал, что Планку пришла в голову замечательная мысль — рассматривать величину кванта действия как конечную не только в процессе вычисления, но и считать ее реально конечной. «Подобные счастливые догадки есть удел тех, которые заслужили его тяжелой работой и глубокими размышлениями». А вот как писал об открытии Планка Нильс Бор в 1929 году: «В истории науки мало таких событий, которые подобно открытию Планком элементарного кванта действия за короткое время одной человеческой жизни привело бы к столь существенным последствиям. Это открытие не только во все возрастающей степени становится основой для упорядочения знаний об атомных явлениях, которые за последние 30 лет чрезвычайно выросли, но и привело одновременно к полному преобразованию принципов описания явлений природы».

По прошествии многих лет можно, конечно, отмечать, что существование постоянной с размерностью действия непосредственно следует уже из той «простейшей» формы закона смещения Вина, которую обнаружил Планк: $S = f(U/\nu)$. Действительно, поскольку аргумент функции должен быть безразмерным, то частота должна быть помножена на некоторую постоянную с размерностью действия. Но только гипотеза о том, что энергия некоторого количества осцилляторов с одной и той же энергией может быть разделена на точно определенное число равных частей, привела к открытию кванта действия. В письме известному американскому физику-экспериментатору Роберту Вуду (R. W. Wood, 1868–1955) в 1931 году Планк

так изложил свои соображения о психологической стороне того, что в свое время его привело к гипотезе о квантах энергии: «...я могу все дело назвать актом отчаяния. Потому что по природе я миролюбив и не расположен к рискованным приключениям. Но тогда я уже 6 лет (с 1894 года) бился над проблемой равновесия между излучением и материей, не достигнув никакого успеха; я знал, что эта проблема имеет фундаментальное значение для физики, и я знал формулу, которая воспроизводит распределение энергии в нормальном спектре; теоретическое объяснение должно было быть поэтому найдено любой ценой и никакая цена не была бы слишком высока. Классическая физика для этого недостаточна, это было мне ясно. Потому что согласно ей энергия должна с течением времени целиком перейти из материи в излучение. Так как она этого не делает, то должна существовать какая-то новая универсальная постоянная, которая может обеспечить, чтобы энергия не распадалась. Но узнать, как это сделать, можно только в том случае, если исходить из определенной точки зрения. Я пришел к этой точке зрения благодаря тому, что твердо держался обоих законов теории теплоты. Эти оба закона казались мне тем единственным, что при всех обстоятельствах должно оставаться неизменным. В остальном я был готов к любой жертве в моих прежних физических убеждениях. Ну, вот Больцман объяснил осуществление термодинамического равновесия через статистическое равновесие; если эти его соображения применить к равновесию между материей и излучением, то оказывается, что преобразование в излучение может быть предотвращено предположением, что энергия с самого начала вынуждена пребывать в определенных количествах. Это было чисто формальное предположение, и я вначале не думал много об этом, помня только лишь о том, что я при всех обстоятельствах любой ценой должен добиться положительного результата...».

В современной квантовой физике постоянная Планка выступает в различных ролях. Наличие постоянной Планка в каких-либо формулах означает, что эти формулы описывают квантовые явления, и постоянная Планка служит мерой квантования. С постоянной Планка связана наименьшая величина кванта действия, и она непосредственно позволяет решить — подчиняется ли данное физическое явление классическим или квантовым законам: если в данной физической системе численное значение некоторой динамической переменной с размерностью действия сравнимо с постоянной Планка, то поведение этой системы должно описываться в рамках квантовой теории. Если же значения переменных с размерностью действия намного превосходят значение постоянной Планка, то система с достаточной точностью описывается законами классической физики. Более точный критерий применимости классических понятий и представлений был установлен в 1927 году Гейзенбергом в виде соотношений неопределенностей. Постоянная Планка фактически служит пере-

водным множителем в корпускулярно-волновой картине. Она связывает волновые и корпускулярные характеристики: энергию частицы с частотой волны, а импульс частицы — с волновым вектором: $E = \hbar \nu$, $\vec{p} = \hbar \vec{k}$.

Постоянная Планка является одной из фундаментальных констант физики, поэтому знание ее точной величины имеет огромное теоретическое и прикладное значение. Согласно недавним измерениям (*J. L. Flowers, B. W. Petley, Rep. Progr. Phys.* **64**, p. 1191, 2001) постоянная Планка равна $\hbar = 6.62606891(58) \cdot 10^{-27}$ эрг·с.

А можно ли, в принципе, вычислить постоянную Планка, как это было сделано, например, для постоянной Ридберга и др.? На этот счет существует идея, что квантование действия имеет космическое происхождение. Эта идея позволяет получить разумную оценку величины постоянной Планка (*F. Calogero, Phys. Lett. A228*, p. 335–346, 1997).

Возникает естественный вопрос — является ли постоянная Планка единственной? Другими словами, одна и та же постоянная связывает корпускулярные и волновые характеристики света, электрона, протона, нейтрона и т. д., или же существуют разные постоянные Планка? Анализ современных экспериментальных данных (*E. Fischbach et al. Phys. Rev. Lett.*, **66**, p. 256, 1991) показал, что с огромной точностью постоянные Планка для фотонов, электронов и т. д. совпадают. Собственно, вся квантовая физика основана на том, что существует единственная фундаментальная постоянная с размерностью действия. Это постоянная Планка. Многочисленные экспериментальные факты подтверждают это, в частности, экспериментальное доказательство существования, так называемых экзотических атомов.

Последнее время обсуждается вопрос о том, происходит ли изменение со временем фундаментальных констант физики, таких как постоянная тонкой структуры, отношение массы протона к массе электрона, гравитационная постоянная, заряд электрона и др. Этот вопрос впервые был поставлен, по-видимому, Вейлем (*H. Weyl*) в 1919 году. Он обнаружил, что существует очень большой безразмерный параметр порядка 10^{40} , равный отношению силы кулоновского взаимодействия между электроном и протоном в атоме водорода к силе их гравитационного взаимодействия. В дальнейшем Милн и Дирак пришли к выводу, что с этим параметром связан ряд соотношений, которые сохраняются при эволюции Вселенной («гипотеза больших чисел»). Например, если ввести ядерную единицу времени, равную отношению диаметра ядер к скорости света ($r_n / c \approx 3 \cdot 10^{-15}$ м / 299792458 мс⁻¹ $\approx 10^{-23}$ с), то отношение возраста Вселенной к ядерной единице времени равно 10^{17} с / 10^{-23} с = 10^{40} . Отсюда следует, что если возраст Вселенной растет линейно со временем, то, например, гравитационная постоянная должна убывать как $1/t$. Аналогичный анализ проводится и для других констант, в частности, для постоянной Планка. На основе современных

геологических, астрономических и физических данных были установлены верхние пределы возможного пространственно-временного изменения физических констант, например, постоянной тонкой структуры и отношения массы протона к массе электрона (Д. А. Варшалович и др. ЖТФ, 69(1), С. 1, 1999). Оказалось, что средняя относительная скорость возможного изменения этих констант за период порядка 10 млрд. лет не превышает 0,02 %.

С помощью постоянной Планка, гравитационной постоянной G и скорости света c Планк ввел систему естественных единиц («*natürliche Maßeinheiten*»), которые называют теперь планковскими единицами. Это планковская единица длины $(G\hbar/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$ см, единица времени $(G\hbar/c^5)^{1/2} \approx 0,5 \cdot 10^{-43}$ с, единица массы $(\hbar c/G)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^{-5}$ з. Рассматривают также единицу энергии $(\hbar c/G)^{1/2} \approx 10^{22}$ МэВ. Планк считал, эти единицы «в силу независимости от специфики тел и веществ сохраняют свое значение для всех времен и для всех культур, в том числе внеземных и не созданных человеком».

Такие единицы используются для проведения некоторых оценок в современных астрофизических задачах (В. Л. Гинзбург, О физике и астрофизике, М.: Наука, 1974).

...каждая раскрытая истина становится ясным и хорошо обоснованным вкладом в науку, вкладом, лишенным таинственности, окутывающей все, лежащее за пределами нашего понимания, и демонстрирующим, что каждый атом творения неисчерпаем в своем совершенстве.

Джеймс Максвелл

ГЛАВА 3 ✦ БОРОВСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АТОМЕ

3.1. НИЛЬС БОР «СПАСАЕТ» РЕЗЕРФОРДОВСКИЙ АТОМ

Вернемся теперь к резерфордовской модели атома. До 1913 года эту модель физики старались не замечать, так как по всем законам классической физики атом в такой модели не должен существовать в природе. Кроме того, из величин, характеризующих планетарный атом — заряд, масса электронов и ядер — невозможно составить величину, имеющую размерность длины, которая давала бы оценку размеров атома. Другими словами, в планетарной модели атома его размер оставался неопределенным. В то время в физическом сообществе появился молодой датский ученый Нильс Бор (*Niels Henrik David Bohr*, 1885–1962).

Нильс Бор родился в Копенгагене в высокообразованной семье профессора физиологии. После защиты докторской диссертации по электронно теории металлов в копенгагенском университете Нильс Бор осенью 1911 года уехал на стажировку в Кембридж для работы в знаменитой Кавендишской лаборатории, где Дж. Дж. Томсон в 1897 году открыл электрон. В 1906 году Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию «за теоретические и экспериментальные исследования электропроводности газов». Ко времени приезда Бора в лабораторию Томсон был увлечен усовершенствованием своей модели атома и ее приложениями, и совершенно не интересовался работой Нильса Бора. Вскоре Бор увидел Эрнеста Резерфорда, самого выдающегося из учеников Дж. Дж. Томсона, и попросился к нему на стажировку.



Бор

Весной 1912 года Бор переехал в Манчестер, где Резерфорд возглавлял кафедру и лабораторию в университете Виктории. Так их свела судьба, уготовившая Бору участь «спасителя» резерфордовской модели атома. Бор стал центральной фигурой в развитии квантовой теории строения атомов и идеологом «копенгагенской» интерпретации квантовой механики, созданной в 1925–1927 годах. Известны также его работы в области ядерной физики. Он создал теорию составного ядра (1936), разработал капельную модель ядра и теорию деления ядра (1939), предсказал спонтанное деление урана. При жизни Бора Копенгаген заслуженно считался «Меккой» для физиков. Бор создал большую интернациональную школу физиков.

Бор сразу же стал сторонником планетарной модели, хотя многими годами позже он признался: «Я никогда не воспринимал планетарную модель буквально». Для Бора это был лишь образ, а не истинное изображение атома. Поскольку атомы в природе существуют и в обычных условиях вполне стабильны, то проблема планетарного атома оказывается проблемой устойчивости электронов, обращающихся вокруг ядер атомов, а это в свою очередь сводится к проблеме устойчивости атомных размеров. Из факта существования атомов, следует, что должны существовать такие минимальные расстояния от ядра, ближе которых электроны не могут находиться. У Бора возникла гениальная мысль, что должна существовать глупинная связь между двумя минимальными величинами в природе: наименьшим расстоянием электронов в атоме и наименьшим квантом действия. Впоследствии Бор вспоминал: «В раннюю пору моего пребывания в Манчестере, весной 1912 года, я пришел к убеждению, что строение электронного роя в резерфордовском атоме управляется квантом действия — постоянной Планка». Это значило, что, принимая планетарную модель атома, необходимо было отказаться от классических представлений. Позднее Бор говорил: «Решающим моментом в атомной модели Резерфорда было то, что она со всей ясностью показала, что устойчивость атомов нельзя

объяснить на основе классической физики и что квантовый постулат — это единственно возможный выход из острой дилеммы. Именно эта острота несоответствия заставила меня абсолютно поверить в правильность квантового постулата».

В конце 1912 года после завершения стажировки Бор, уезжая в Данию, оставил Резерфорду «Памятную записку», в которой он впервые высказал идею об устойчивости орбит и о связи электронных орбит со строением периодической системы элементов. Это была его грандиозная программа — объяснить не только устойчивость планетарной модели, но и дать объяснение «свойств материи, зависящих от системы электронов в атоме». В ответ Резерфорд посоветовал не спешить с выводами. Но вскоре выяснилось, что спешить было надо. Оказалось, что к тому времени в Кембридже астрофизик Дж. Никольсон (*J. W. Nicholson*) опубликовал ряд статей, в которых он постулировал, что проекция момента импульса электрона в атоме L квантуется, т. е. принимает целочисленные значения: $L = n h / 2\pi$, где n — целое число, h — постоянная Планка. На основе этого постулата Никольсон нашел дискретные орбиты атома, на каждой из которых, по его предположению, вращались группы электронов. По классическим представлениям, электроны излучают электромагнитные волны с частотой, равной частоте их обращения вокруг ядра. Это и предполагал Никольсон. С помощью такого предположения, приближенно справедливого, как потом оказалось, для сильно возбужденных состояний атомов, Никольсон объяснил многие особенности излучения солнечной короны и туманностей.

Вероятно последним толчком к научному озарению Нильса Бора стала его случайная встреча в начале февраля 1913 года с сокурсником по университету Хансом Хансеном (*H. Hansen*), который был специалистом по спектроскопии. Бор поделился с ним своими идеями о строении вещества на основе планетарного атома с орбитами, устойчивыми по каким-то непонятным причинам. В разговоре Хансен спросил Бора, как его теория объясняет спектральные закономерности, открытые Бальмером, Ритцем и другими. И тут выяснилось, что Бор не знал ни формулу Бальмера, ни другие спектральные закономерности. Бор решил ликвидировать свой пробел и по его воспоминаниям, «*Как только я увидел формулу Бальмера, все немедленно прояснилось передо мной*». Это была минута научного озарения, и за короткий срок — менее чем за месяц — он подготовил первую, самую существенную часть своей работы «О строении атомов и молекул», которую он затем опубликовал в журнале «*Philosophical Magazine, Series 6, Vol. 26, p. 1–25*» в 1913 году (*Н. Бор. Избранные научные труды. Т. 1. М.: Наука, 1970*).

До Бора обобщенную формулу Бальмера, и связанный с ней комбинационный принцип Вальтера Ритца (*W. Ritz, 1878–1909*) многие рассматривали как «*забавную игру чисел*». Бор впервые открыл глубинный физический смысл этой формулы, «увидев» в ней, как «*рождаются*» кванты излу-

чающего атома. Он понял, что частота спектральной линии атома связана не с частотой обращения электронов вокруг ядра, как этого требовали классические представления, а с энергией излучения, возникающего при переходе атома из одного своего дискретного состояния в другое.

Действительно, если умножить левую и правую части обобщенной формулы Бальмера на постоянную Планка $h\nu = \frac{hR}{m^2} - \frac{hR}{n^2}$, то видно, что

левая часть этой формулы представляет квант энергии излучения частоты ν , а в правой части стоит разность двух членов, каждый из которых также должен иметь размерность энергии. Что это за энергия? Естественно предположить, что эти два члена представляют собой энергию атома до и после излучения фотона, так что написанная формула есть не что иное, как закон сохранения энергии. В самом деле, если принять, что $E_n = -\frac{hR}{n^2}$ —

энергия атома до излучения, а $E_m = -\frac{hR}{m^2}$ — его энергия после излучения,

то энергия испущенного атомом фотона равна $h\nu = E_n - E_m$. Теперь уже нетрудно понять знаменитые квантовые постулаты Бора, которые совместили факт существования атомов с дискретным характером их спектров:

1. Существуют *стационарные* (не зависящие от времени) *состояния*, находясь в которых атомы не испускают и не поглощают энергию. Эти состояния характеризуются дискретным набором значений энергии E_1, E_2, E_3, \dots
2. Испускание и поглощение излучения происходит при скачкообразном переходе атома из одного его дискретного состояния в другое, при этом энергия испущенного или поглощенного кванта определяется уравнением $h\nu = E_n - E_m$.

Бор так разъясняет сделанные им допущения:

«Стационарные состояния... отличаются своеобразной стабильностью; это проявляется в том, что всякое продолжительное изменение движения замкнутой системы представляет собой полный переход этой системы из первоначального состояния в другое, отличное от него стационарное состояние...».

Процесс перехода «сопровождается испусканием гомогенного излучения, для которого соотношение между частотой и количеством излученной энергии определяется теорией Планка». При этом Бор подчеркивал, что «принимая теорию Планка, мы признаем открыто недостаточность обычной электродинамики и решительно порываем с тесно связанной цепью положений этой теории». Бор вполне осознавал, что «второе допущение

находится в очевидном противоречии с обычными идеями электродинамики, но кажется необходимым для объяснения экспериментальных фактов». Несмотря на подобные разъяснения известный немецкий физик Макс фон Лауэ (M. Laue, 1879–1960) в то время возмущенно говорил: «Это вздор! Уравнения Максвелла действительны во всех обстоятельствах, и электрон должен излучать непрерывно».

Первый постулат представляет собой, собственно, признание факта, что атомы в природе существуют. Но для этого необходимо по Бору считать, что атом может находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии, и электроны в атомах обращаются вокруг ядра на определенных дискретных расстояниях. Находясь на минимальном расстоянии от ядра, электрон больше не может никуда «перескочить», так что он должен находиться в этом состоянии бесконечно долго. Так объясняется устойчивость атомов.

Второй постулат опирается на квантовую гипотезу Планка и является обобщением опытных результатов о спектральных линиях излучающего атома. Оценивая постулат о квантовых переходах, Эйнштейн в 1916 году писал: «...Ныне можно утверждать, что он принадлежит к числу надежно установленных основ нашей науки». Глубинный смысл этого постулата заметил Резерфорд. Он писал Бору: «Мне кажется, Вы будете вынуждены допустить, что электрон заранее знает, где ему остановиться». Действительно, частота испускаемого кванта не может измениться «по дороге», и получается, что у электрона, совершающего скачок в атоме, возникает «свобода выбора». Понимание этой проблемы, которая полностью решена современной квантовой теорией, стало возможным после того, как Эйнштейн в 1916 году в работе «К квантовой теории излучения» ввел понятие вероятности переходов между дискретными состояниями атомов. Например, в спектре атомов натрия характерной является желтая линия. Это значит, что «желтый» скачок для атомов натрия является наиболее вероятным.

Вводя гипотезу о скачках, Бор тем самым впервые использовал ненаглядные представления в физике. Дело в том, что поведение электрона во времени при скачкообразном, т. е. мгновенном переходе из одного состояния в другое совершенно невозможно представить. В то же время в пространстве такой скачок изображается, по Бору, как переход из одного состояния в другое. Проблема скачкообразных переходов еще долго волновала умы физиков (см., например, Э. Шредингер, Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976; G. Greenstein et al., Amer. J. Phys. 63(8), p. 743, 1995). Вместе с тем надо сказать, что по современным квантовым представлениям наглядное изображение круговых или эллиптических орбит электронов в атоме является некорректным, потому что никаких траекторий электронов в атоме не существует.

Постулаты Бора резко противоречат представлениям классической физики, но именно отказ от этих представлений и введение идеи квантов в мир атома, позволило Бору построить первую квантовую теорию атома.

3.2. КАК БЫЛИ ДОКАЗАНЫ ПОСТУЛАТЫ БОРА

Существование дискретных состояний в атоме было непосредственно доказано в 1914 году в опытах немецких физиков Джеймса Франка (*J. Franck*, 1882–1964) и Густава Герца (*G. Hertz*, 1887–1975). Первоначально Франк и Герц, еще не зная теории Бора, ставили перед собой задачу об измерении потенциалов ионизации некоторых атомов, в частности, атомов ртути. Много лет спустя Джеймс Франк признался: *«Поскольку в то время среди физиков господствовало откровенное недоверие к попыткам сконструировать модель атома при тогдашнем уровне знаний, то мало кто давал себе труд внимательно прочитать посвященную атому работу. Особо следует отметить, что Густав Герц и я вначале были неспособны понять огромное значение работы Бора»*.

Схема первых экспериментов Франка и Герца изображена на рис. 3.1. Здесь K — горячий катод, к которому приложен ускоряющий отрицательный потенциал V . На сетку N подавался небольшой положительный потенциал (≈ 0.5 В). Между сеткой и коллектором — анодом A возникало тормозящее для электронов поле. Результаты их измерений изображены на рис. 3.2, где показана зависимость тока на коллекторе от ускоряющего напряжения. С ростом ускоряющего напряжения ток возрастает до тех пор, пока потенциал не достигает значение V_i , при котором происходит неупругое столкновение электрона с атомом. В результате этого ток через коллектор резко уменьшается.

При дальнейшем увеличении ускоряющего потенциала ток вновь возрастает, пока не достигается потенциал $2V_i$. Тогда возникает второй максимум и т. д. Франк и Герц посчитали значение V_i потенциалом ионизации, и нашли, что для атомов ртути этот потенциал равен 4,9 В. Однако в вакуумной трубке, заполненной парами ртути, которые «бомбардировались» электронами, не наблюдались положительные ионы, которые должны были бы образоваться при ионизации атомов ртути.

Обсуждение этих результатов привело к пониманию того, что на самом деле был измерен не потенциал ионизации, а потенциал возбуждения атомов ртути. Так было показано, что существуют дискретные энергетические состояния, и что первый возбужденный уровень энергии атома ртути

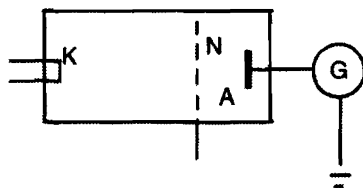


Рис. 3.1

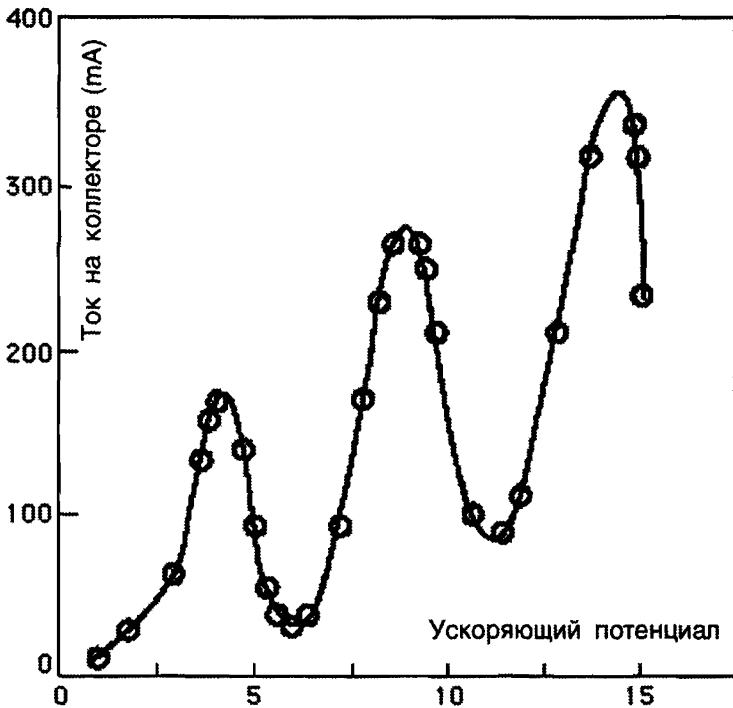


Рис. 3.2

отстоит от основного уровня на величину 4,9 эВ. Другими словами, если атом ртути находится в нормальном состоянии с энергией E_1 , то в следующем состоянии его энергия равна $E_2 = E_1 + 4,9$ эВ.

В других опытах Франк и Герц подтвердили также второй постулат Бора. Если атомы ртути после их «обстрела» электронами переходят в состояние с энергией E_2 , то при обратном переходе $E_2 \rightarrow E_1$ должно испускаться, по Бору, излучение с энергией $h\nu = E_2 - E_1$. Излучение с дли-

ной волны $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \approx 2520 \text{ \AA}$, относящееся к ультрафиолетовой области

спектра, действительно было зарегистрировано в эксперименте.

Бор с удовлетворением воспринял опыты Франка и Герца. Он писал: «Результаты этих опытов показали, что при соударениях с электроном атом не может получить произвольное количество энергии, а только такое ее количество, которое точно соответствует энергии, необходимой для перевода атома из нормального состояния в одно из остальных стационарных состояний; о существовании последних нам известно из дан-

ных о спектрах, поскольку энергия этих состояний тесно связана с величиной спектральных термов».

Работа Франка и Герца была оценена Нобелевской премией в 1925 году.

Современные эксперименты по определению уровней энергии атомов проводятся с высокой точностью с помощью различных установок — спектрометров.

3.3. АТОМ БОРА

Первую попытку построить квантовую теорию атома водорода предпринял в 1910 году молодой в то время австрийский физик Артур Гааз (*A. Haas*, 1884–1941). Основываясь на томсоновской модели атома и квантовых представлениях, он вычислил постоянную Ридберга, численное значение которой, однако, во много раз отличалась от экспериментального значения. Идеи Гааза в то время были подняты на смех за «наивную попытку» сочетать между собой столь «несовместимые вещи», как спектроскопия и квантовая теория излучения.

Бор исходил из планетарной модели атома водорода и атомов — ионов с одним электроном, которые называются *водородоподобными*. В составе водородоподобных атомов находится только один электрон, а заряд ядра равен Ze . Как отмечал Бор, строение атома водорода вытекает из опытов Дж. Дж. Томсона с положительными лучами: никогда не наблюдалось у атома водорода более одного положительного заряда, тогда как атомы других исследованных элементов могли появляться с более высокими зарядами.

В соответствии с планетарной моделью Бор в своей работе рассматривает электрон, который движется со скоростью, намного меньшей скорости света, по замкнутой траектории вокруг ядра. *«Частота обращения ω и главная ось орбиты $2a$ будут зависеть от количества энергии W , которую надо сообщить системе, чтобы удалить электрон на бесконечно большое расстояние от ядра»*. Эти величины определяются формулами (в современных обозначениях):

$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{3/2}}{Ze^2 \sqrt{m}}, \quad 2a = \frac{Ze^2}{W}. \quad (1)$$

Затем Бор полагает, что орбита, о которой идет речь, круговая, и использует идею Планка о том, что количество энергии, испускаемой при каждом акте излучения, равно $h\nu$. Дальнейшие рассуждения Бора подтверждают гениальность хода его мыслей и поразительную физическую интуицию. Он предполагает, что электрон вначале находится очень далеко от ядра и не обладает относительно него заметной скоростью и что после встречи с ядром электрон попадает на стационарную орбиту вокруг ядра. *«Теперь допустим, что электрон испускает монохроматическое излу-*

ние с частотой ν , равной половине частоты обращения электрона на своей окончательной орбите». Именно такое предположение приводит к правильному результату! Таким образом, положив

$$W = nh\nu/2, \quad (2)$$

с помощью формулы (1) мы получим

$$W = \frac{2\pi^2 mZ^2 e^4}{n^2 h^2}, \quad \omega = \frac{4\pi^2 mZ^2 e^4}{n^3 h^3}, \quad 2a = \frac{n^2 h^2}{2\pi^2 m e^2}. \quad (3)$$

«Если в этих выражениях придать n разные значения, получим ряд значений W , ω и a , соответствующих ряду конфигураций системы. Согласно предыдущим рассуждениям мы приходим к выводу, что эти конфигурации соответствуют состояниям системы, в которых нет излучения энергии, а потому они будут стационарными, пока система не будет возмущена извне. Мы видим, что значение W максимально, когда n получает наименьшее значение, равное единице. Этот случай будет соответствовать наиболее устойчивому состоянию системы, т. е. будет соответствовать той связи электрона, для разрыва которой приходится затрачивать наибольшее количество энергии».

Используя известные в то время значения постоянных, Бор получил оценки:

$$2a = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}, \quad \omega = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}, \quad W/e = 13 \text{ В}.$$

«Мы видим, что эти величины того же порядка, что и минимальные размеры атома, оптические частоты и ионизационные потенциалы».

Для нахождения частоты излучения Бор использует второй постулат и находит

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right).$$

Это было блестящей победой теории, поскольку бальмеровская серия атома водорода нашла естественное объяснение, и к тому же стало возможным

вычислить теоретически постоянную Ридберга $R = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3} = 3,1 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

С учетом движения атомного ядра теоретическое значение постоянной Ридберга прекрасно согласуется с экспериментальным значением, полученным из самых точных спектроскопических измерений.

В этой же своей работе Бор показал, что предположение (2) в случае круговых орбит эквивалентно условию квантования. Согласно этому условию момент импульса электрона, находящегося на круговой орбите с радиусом r_n , является кратным постоянной Планка: $m_e \nu r_n = nh/2\pi$.

По мере увеличения энергии (увеличения числа n) разность между соседними уровнями энергии становится столь незначительной, что можно говорить о почти непрерывном изменении энергии. Но непрерывное изменение физических величин характерно для классической физики. Таким образом, при достаточно больших значениях числа n , которое Бор назвал *главным квантовым числом*, результаты квантовой теории должны совпадать с результатами, полученными на основе классических представлений. В этом заключается *принцип соответствия*, впервые сформулированный Бором в 1918 году в работе «О квантовой теории линейчатых спектров». Бор писал: *«Оказалось, что, хотя мы и должны отказаться от применения механики при описании перехода из одного стационарного состояния в другое, тем не менее, можно построить связную теорию этих состояний, пользуясь обычной механикой для описания движения в самих стационарных состояниях. Далее процесс излучения, связанный с переходом из одного стационарного состояния в другое, не может быть прослежен в деталях с помощью обычных электромагнитных представлений. Свойства излучения атома с точки зрения этих представлений обусловлены непосредственно движением системы и разложением этих движений на гармонические компоненты. Тем не менее, оказалось, что существует далеко идущее соответствие между различными типами возможных переходов от одного стационарного состояния к другому, с одной стороны, и различными гармоническими компонентами — с другой»*.

Непосредственные расчеты по Бору показывают, что, например, частоты спектральных линий, соответствующих переходам между сильно возбужденными состояниями (при $n \gg 1$), равны частоте обращения электрона вокруг ядра и гармоникам этой частоты. Таким образом, при больших значениях главного квантового числа квантовые закономерности плавно переходят в классические закономерности, так что единство природы не нарушается. Вместе с тем Бор подчеркивал, что *«Принцип соответствия должен рассматриваться как чисто квантово-теоретический закон, который никоим образом не может уменьшить контраст между этими постулатами и классической электродинамикой...»*.

За исследования строения атома Нильсу Бору в 1922 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

3.4. ТРИУМФ ТЕОРИИ БОРА

Теория Бора сразу же получила высокую оценку выдающихся физиков того времени — Эйнштейна, Лоренца, Планка, Резерфорда, Джинса, а Зоммерфельд активно включился в развитие теории. В первой своей большой (более 60 страниц) уже упоминавшейся статье Бор проанализировал все экспериментальные факты того времени, относящиеся к строению атомов и молекул, при этом он использовал излюбленный прием — представ-

лять одни и те же формулы как бы с разных сторон, в разных их проявлениях. Он не столько заботился о математической корректности описания, сколько об оценках и качественном понимании явлений. Об этом много лет спустя писал Гейзенберг в своей статье «Квантовая теория и ее интерпретация»: *«Математическая ясность сама по себе не представляла для Бора какой-то особенной ценности. Он опасался, что формальная математическая структура скроет физическую сущность проблемы, и был убежден, что законченное физическое описание должно безусловно предшествовать математической формулировке. Пожалуй, уже в тот момент я был в большей степени, чем Бор, готов отойти от наглядных картин и сделать шаг по пути к математической абстракции».*

Одним из убедительных доказательств справедливости теории Бора стало объяснение спектральной серии, которую открыл в 1896 году американский астроном Эдвард Пикеринг (*E. Pickering*, 1846–1919) в спектре звезды ζ *Puppis* (Кормы). Эта серия очень напоминала серию Бальмера. Считалось, что она связана с водородом, находящимся в звездах в каком-то особом состоянии. Аналогичные серии наблюдал английский ученый Фаулер (*A. Fowler*) в 1912 году в лабораторных исследованиях спектра газоразрядной трубки, содержащей смесь водорода и гелия. Таким образом, возникла противоречивая совокупность фактов. Этот клубок противоречий распутал Бор. Из теории Бора следовало, что постоянная Ридберга для водородоподобного атома зависит от заряда его ядра: $R_Z = Z^2 R_H$, где R_H — постоянная Ридберга для атома водорода. Бор предположил, что серия Пикеринга принадлежит вовсе не водороду, а ионизованному гелию He^+ . Это — водородоподобный атом гелия, порядковый номер которого $Z = 2$. Частоты спектральных серий иона He^+ по теории Бора должны определяться формулой

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \equiv R \left(\frac{1}{(m/2)^2} - \frac{1}{(n/2)^2} \right).$$

Отсюда при $m = 4$ получается серия Пикеринга, в которой каждая вторая линия идентична с одной из линий серии Бальмера в спектре водорода. Вскоре эти предсказания Бора экспериментально подтвердили Пашен и Эванс (*E. J. Evans*). Они показали, что серия Пикеринга легко получается в чистом гелии без всяких следов водорода, но не может быть получена в чистом водороде. Фаулер согласился, что наблюдаемые линии можно приписать гелию, но в то же время считал, что полученные результаты неокончательны, так как, по его мнению, в сильном разряде могло происходить свечение остатков водорода. Кроме того, он указал на систематическое отклонение некоторых линий от формулы Бора, выходящее за пределы ошибок измерений. Тогда Бор уточнил расчеты, в которых он учел движение ядер атомов. В задаче двух тел (электрон и ядро) это сводится к замене

массы электрона на приведенную массу. С учетом движения атомного ядра постоянная Ридберга для водородоподобного атома оказывается зависящей от массы ядра: $R_Z = R_H / (1 + m_e / M_Z)$, где M_Z — масса ядра с номером Z . Тогда следует ожидать, что бальмеровские линии для водорода и иона He^+ должны быть немного смещены относительно друг друга. Проведенные Бором такого рода расчеты смещения спектральных линий блестяще совпали с экспериментальными данными.

Зависимость постоянной Ридберга от массы ядра объясняет также *изотопическое смещение* спектральных линий. По такому смещению американский физик Гарольд Юри (*H. Urey*, 1893–1981) в 1932 году открыл тяжелый изотоп водорода — *дейтерий*.

Очень поучительна история открытия тяжелого водорода. Английский физик и химик Фрэнсис Астон (*F. Aston*, 1877–1945) с помощью изобретенного им в 1919 году масс-спектрографа определил, что атомный вес водорода по отношению к атомному весу кислорода, условно принятому за 16,00000, равен $1,00778 \pm 0,000015$. Это хорошо совпадало со значением, полученным химическими методами: $1,00777 \pm 0,00002$. Однако вскоре выяснилось, что атмосферный кислород является смесью двух изотопов — O^{16} и O^{18} , количества которых находятся в постоянном отношении 630:1. Учитывая это, американский физик Раймонд Бердж (*R. Berge*, 1887–1980) в 1931 году высказал гипотезу, что в действительности обычный водород представляет собой смесь двух изотопов — легкого с массой около 1 и тяжелого с массой около 2. По разности масс-спектрографического и химического атомных весов он определил, что отношение количеств легкого и тяжелого изотопов в обычном водороде должно быть равно 4500:1. Этот пример наглядно показывает, как чрезвычайно важными являются точнейшие измерения физических постоянных. В связи с этим очень справедливо остроумное замечание одного из исследователей конца XIX века, который сказал: «*сколько еще открытий таится вокруг шестого десятичного знака!*».

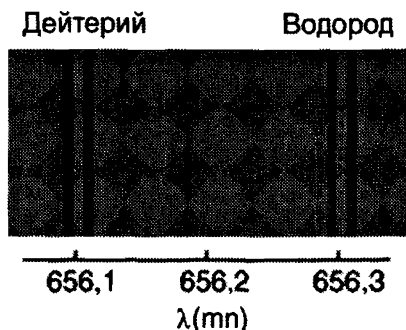


Рис. 3.3

Юри воспользовался тем, что масса тяжелого изотопа в два раза больше массы легкого, поэтому их свойства заметно различаются. Сотрудники Юри осторожно испаряли 3 л жидкого водорода при давлении в несколько мм рт. ст. Поскольку легкий водород испарялся быстрее тяжелого, то по мере испарения происходило увеличение концентрации тяжелого водорода в остающейся смеси. Когда объем смеси составил доли кубического см, этот остаток был введен в разрядную трубку и затем был сфотографирован спектр. В спектре действительно оказались линии, смещенные относительно легкого водорода в полном соответствии с тем, что постоянная Ридберга зависит от массы ядра атома (рис. 3.3). Юри назвал тяжелый водород дейтерием — *D*.

Дейтерий является стабильным изотопом. В состав его ядра входит протон и нейтрон. Существует также второй тяжелый изотоп водорода — *третий* — *T*. Его ядро состоит из протона и двух нейтронов. Третий является радиоактивным элементом. Дейтерий и третий играют важную роль в исследованиях по проблеме управляемого термоядерного синтеза, а ядро дейтерия — дейтерон является одним из «снарядов» в ядерной физике, применяемых для расщепления атомных ядер.

На основе своей теории Бор показал далее, что спектры орто — и пара — гелия относятся не к двум разным элементам, как в то время считалось, а к несколько различающимся состояниям одного и того же элемента — гелия. В 1915 году Бор впервые применил теорию относительности к электронам, вращающимся вокруг ядра. Он пришел к выводу, что с учетом релятивистской массы электрона только круговые орбиты могут быть стационарными, эллиптические же орбиты должны прецессировать.

Триумфальное шествие теории Бора связано также с исследованиями рентгеновских спектров. В 1914 году немецкий физик Вальтер Коссель (*W. Kossel*, 1888–1956), используя идеи Бора, построил теорию рентгеновских спектров. Рано погибший в 1914 году в 1-ой мировой войне талантливый ученик Резерфорда Генри Мозли (*H. G. J. Moseley*, 1887–1915) экспериментально установил, что величина $Q = \sqrt{\nu/(3/4)\nu_0}$ увеличивается на единицу при переходе к соседнему элементу периодической системы Менделеева. Здесь ν — частота линии характеристического спектра K_α , $\nu_0 = R = 3,1 \cdot 10^5 c^{-1}$ — постоянная Ридберга. Возрастание Q на 1 при переходе от одного элемента к следующему свидетельствовало о том, что величина Q играет фундаментальную роль в характеристике атома. Мозли дал объяснение этому на основе теории Бора о спектре атома водорода.

Он нашел, что число $Q = Z - \sigma_n$, где Ze — заряд ядра, σ_n — величина, характеризующая эффект экранирования ядра электронами. Для K — оболочки $\sigma_n \approx 1$, так что частота линии K_α определяется формулой

$$\nu_{K_\alpha} = R(Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right). \text{ Другие линии рентгеновского спектра опреде-}$$

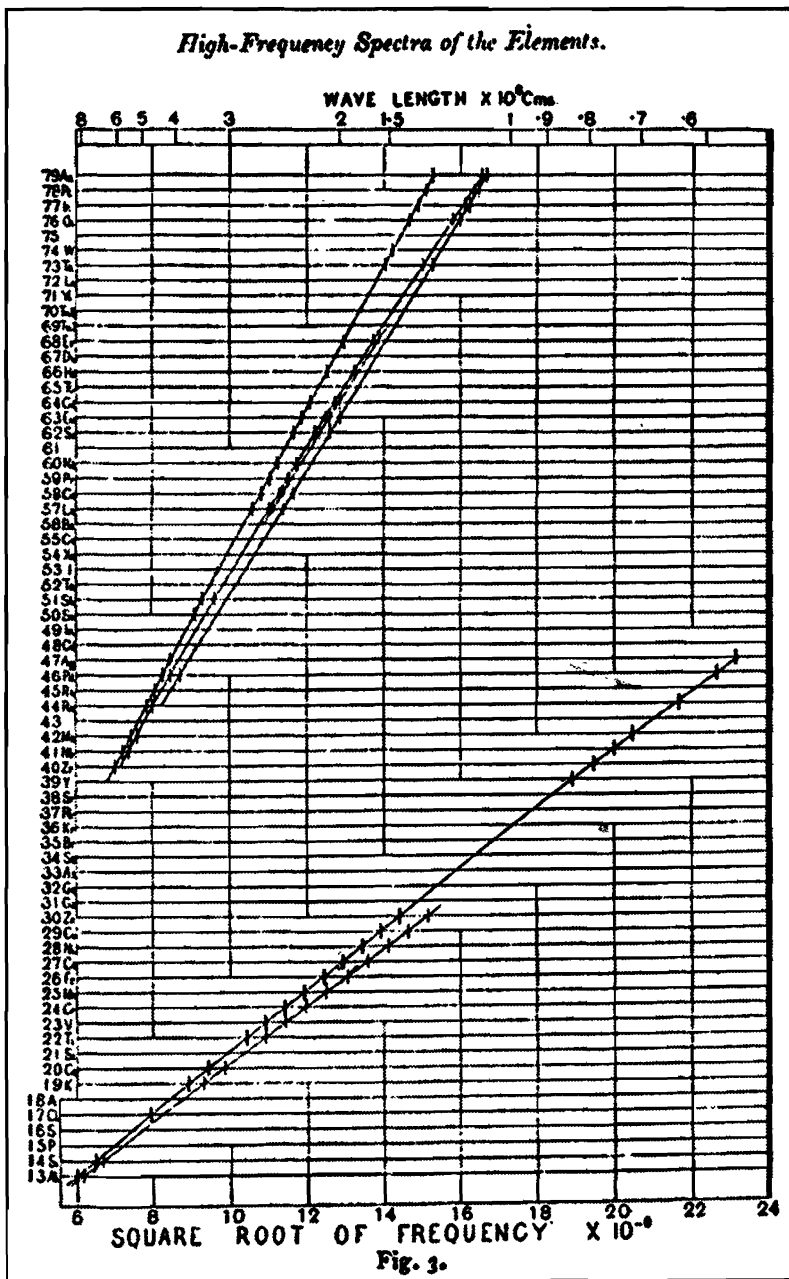


Рис. 3.4

ляются аналогичными формулами. Такие формулы устанавливают линейную зависимость корня квадратного из частоты спектральной линии от атомного номера (рис. 3.4). Эта связь (закон Мозли) позволяет по измеренной частоте (или длине волны) точно установить атомный номер данного элемента, и, следовательно, заряд его ядра. Закон Мозли впервые продемонстрировал, что не атомный вес, а атомный номер, определяющий заряд ядра, является основной характеристикой атома при его расположении в периодической системе элементов. Мозли показал, например, что порядковый номер кобальта равен 27, а никеля 28, в то время как их атомные массы равны, соответственно 58,97 и 58,68. Так Мозли убедительно подтвердил гипотезу Ван ден Брука о том, что решающую роль в расположении элементов в периодической системе играет не атомный вес, а заряд ядра, равный атомному номеру. Резерфорд и Бор придерживались таких же взглядов. Мозли писал: *«Эти данные являются важным критерием в вопросе о внутреннем строении атома, и решительно подкрепляют точку зрения Резерфорда и Бора»*.

Никольсон и Линдеман (*F. Lindemann*) возражали против такой интерпретации. Никольсон вообще отрицательно относился к теории Бора. Он подчеркивал трудности этой теории в объяснении строения более тяжелых элементов и утверждал, что между теорией Бора и гипотезой Ван ден Брука имеется противоречие. Кроме того, он считал, что рентгеновские лучи возникают, скорее всего, в ядре. А Линдеман полагал, что опыты Мозли подтверждают лишь гипотезу Ван ден Брука, но не теорию Бора.

Теория Бора, объяснившая в свое время многие явления и экспериментальные факты, дала мощный толчок всему дальнейшему развитию атомной физики.

3.5. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ БОРА

Теория Бора была обобщена в 1916 году немецким физиком Арнольдом Зоммерфельдом (*A. Sommerfeld*, 1868–1951) на случай систем с несколькими степенями свободы, в частности, на случай атома водорода, в котором электрон описывает эллиптическую траекторию. Для этого надо было сформулировать правила квантования для каждой степени свободы. Прежде всего, Зоммерфельд показал, что условие квантования боровских орбит вытекает из требования: $\oint pdq = nh$, где p и q — канонически сопряженные импульс и координата, а интегрирование проводится по замкнутому циклу периодического движения.

Зоммерфельд предположил, что такое требование следует перенести на каждую k -ую степень свободы рассматриваемой системы, вводя квантовое число n_k для этой степени свободы:

$$\oint p_k dq_k = n_k h.$$



Зоммерфельд

Зоммерфельд, рассматривая обобщенные правила квантования как фундамент квантовой теории, считал их как «недоказанные и, вероятно, недоказуемые утверждения». Лишь с созданием квантовой механики с помощью метода Вентцеля—Крамерса—Бриллюэна (ВКБ) условия Зоммерфельда были выведены строго как некие приближения.

Арнольд Иоганн Вильгельм Зоммерфельд был крупным физиком-теоретиком. Его работы посвящены квантовой теории атома, спектроскопии, квантовой теории металлов, математической физике. Он развил теорию Бора, ввел радиальное и азимутальное квантовые числа, объяснил тонкую структуру спектров. Ввел постоянную тонкой структуры. Совместно с Дебаем в 1916 году развил квантовую теорию эффекта Зеемана и ввел магнитное квантовое число. В 1920 г. ввел внутреннее квантовое число. В 1928 году разработал квантовую электронную теорию металлов. Он издал ряд учебников по теоретической физике. Основал Мюнхенскую школу теоретической физики. Его учениками были многие выдающиеся физики (В. Гейзенберг, В. Паули, П. Дебай, Х. Боте, Г. Вентцель, В. Гайтлер, В. Коссель, А. Ланде и др.).

Для того чтобы условия квантования имели определенный смысл, необходимо, чтобы обобщенный импульс p_k являлся функцией только «своей» обобщенной координаты q_k . Такие механические системы действительно существуют. Они называются системами с разделяющимися переменными или условно-периодическими системами. Для механических систем другого типа указанные условия квантования оказываются неопределенными, но и все эти идеи квантования стали ненужными после создания квантовой механики.

Как пример квантовой системы с двумя степенями свободы Зоммерфельд рассмотрел эллиптическое движение электрона в атоме водорода. В качестве обобщенных координат, описывающих движение электрона вокруг бесконечно тяжелого ядра, выбирался радиус r и полярный угол φ . Соот-

ветствующие обобщенные координаты равны $p_\varphi = mr^2\dot{\varphi}$, $p_r = mr\dot{r}$. Условия квантования в этом случае записываются в виде $\int_0^{2\pi} p_\varphi d\varphi = kh$,

$\oint p_r dr = n_r h$. Так были введены *радиальное* n_r и *азимутальное* (или *орбитальное*) k квантовые числа, которые в сумме определяли главное квантовое число: $n = n_r + k$. Энергия атома водорода при этом оказалась зависящей только от главного квантового числа, как и в случае круговых орбит, что, собственно, и наблюдается на опыте. По этому поводу Зоммерфельд писал: «*Это результат огромного значения и впечатляющей простоты*».

Зоммерфельд исключил значение $k = 0$, поскольку оно соответствует электрону, «*проходящему сквозь ядро атома*». Однако дальнейшие исследования показали, что состояния электрона в атоме с нулевым моментом импульса возможны. Они соответствуют сферически-симметричному состоянию электрона около ядра. Поэтому в современной квантовой теории орбитальное квантовое число обозначают как $\ell = k - 1$. Исследования показали также, что излучение фотона атомом возможно лишь при вполне определенных изменениях орбитального квантового числа. Другими словами, оказалось, что некоторые переходы в атоме являются *запрещенными*, и существуют *правила отбора* для азимутального квантового числа (и для других квантовых чисел). Один из сотрудников Зоммерфельда Альберт Рубинович (*A. Rubinovicz*) впервые показал, что переходы между эллиптическими орбитами возможны лишь в тех случаях, когда азимутальное квантовое число или не изменяется вовсе, или изменяется на ± 1 . Такое правило отбора независимо получил также Бор на основе принципа соответствия.

3.6. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КВАНТОВАНИЕ

По Бору—Зоммерфельду каждый электрон в атоме обращается по замкнутой орбите. Всякая орбита характеризуется тройкой квантовых чисел: главным квантовым числом n , орбитальным (или азимутальным) квантовым числом ℓ и магнитным квантовым числом m , которое также ввел Зоммерфельд. С этими числами связывали вполне наглядный геометрический образ: главное квантовое число, принимающее целочисленные значения 1, 2, 3, ..., определяет «размеры» орбиты (ее радиус в случае круговой орбиты, полуось в случае эллиптической орбиты); орбитальное квантовое число, принимающее n целочисленных значений 0, 1, 2, ..., $n - 1$, определяет вытянутость орбиты; магнитное квантовое число, принимающее $2\ell + 1$ значений $-\ell, -\ell + 1, \dots, \ell - 1, \ell$, определяет ориентацию орбиты в пространстве. Чем ближе число ℓ к нулю, тем больше форма орбиты приближается к круговой. Последовательные квантовые представле-

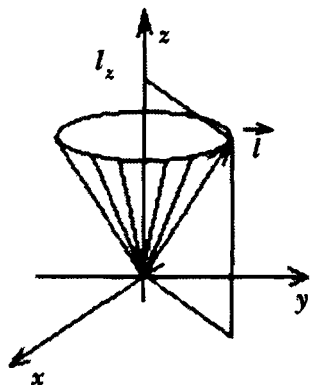


Рис. 3.5

ния приводят, однако, к выводу, что никаких траекторий электрона в атоме не существует. Вместе с тем квантовые числа существуют, но они не имеют того геометрического смысла, который им придавали в теории Бора—Зоммерфельда. Эти числа описывают квантовые состояния электрона в атоме и имеют непосредственный физический смысл.

Главное квантовое число определяет энергию электрона в стационарном состоянии. Азимутальное квантовое число определяет величину (модуль) $|\vec{\ell}|$ вектора момента импульса $\vec{\ell}$: $|\vec{\ell}| = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)}$. Магнитное квантовое число определяет проекции этого вектора на выделенное направление в пространстве, например, на ось z : $\ell_z = m\hbar$. Угол между вектором момента импульса и выделенным направлением определяется формулой: $\cos\theta = \ell_z / |\vec{\ell}|$ (рис. 3.5). Отсюда видно, что при заданной величине вектора момента импульса угол θ (и проекция ℓ_z) принимают дискретные значения. Это значит, что вектор момента импульса имеет определенные дискретные направления в пространстве. Например, в случае $\ell = 1$ магнитное квантовое число имеет три значения: $m = -1, 0, 1$. Этим значениям соответствуют три ориентации вектора момента импульса. Такие геометрические образы называют *пространственным квантованием*. В боровской теории под пространственным квантованием понимали выделение определенных дискретных ориентаций плоскости орбиты в пространстве. Как писал Зоммерфельд, «Бесспорно, пространственное квантование кеплеровских орбит принадлежит к самым неожиданным следствиям квантовой теории. По простоте вывода и результатов оно представляется почти волшебством». Экспериментальное доказательство пространственного квантования орбит Зоммерфельд усматривал в зеемановском расщеплении спектральных линий и в опытах Штерна и Герлаха.

3.7. ЗЕЕМАНОВСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В 1896 году нидерландский физик Питер Зеeman (*P. Zeeman*, 1865–1943) впервые обнаружил, что в магнитном поле две *D*-линии излучающего атома натрия «отчетливо уширились».

Зеeman использовал мощный электромагнит Генриха Румкорфа (*H. Ruhmkorff*, 1803–1877), питавшийся от батареи аккумуляторов с током 27 А, решетку Генри Роуланда (*H. Rowland*, 1848–1901) с радиусом 10 футов и 14 983 штрихами на дюйм. На кусочке асбеста, смоченного раствором обычной соли, оставалось небольшое количество натрия, который попадал в пламя горелки Бунзена и помещался между полюсами электромагнита.

Зеeman так описывал результаты своих экспериментов: «Если ток включался, две *D*-линии отчетливо уширились. Если ток выключался, они возвращались к первоначальному положению. Появление и исчезновение уширения совпадало во времени с включением и выключением тока. Эксперимент можно было повторять сколько угодно раз». На основании проведенных экспериментов Зеeman пришел к выводу: «представляется весьма вероятным, что период натриевого излучения изменяется в магнитном поле».

Зеeman сообщил Лоренцу (*H. Lorentz*, 1853–1928) о своих результатах до их опубликования, и Лоренц тут же дал им объяснение на основе электронной теории. Удивительно, что в то время еще оспаривалось само существование атомов, а Лоренц (и большинство физиков) уже не сомневался в том, что атом имеет структуру! Лоренц разложил движение квазиупруго связанной заряженной частицы в атоме на линейное колебание, происходящее в направлении магнитного поля, и два круговых движения, происходящих в противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Используя эти соображения, Лоренц предсказал, что излучение от краев уширенной линии при наблюдении в продольном направлении должно быть поляризовано по кругу, а в поперечном направлении — линейно поляризовано. Этот вывод Зеeman немедленно подтвердил с помощью четвертьволновой пластинки и анализатора.

При объяснении эффекта Зеemана Лоренц исходил из уравнения равновесия вращающегося электрона, совершающего малые колебания и испытывающего действие силы Лоренца в магнитном поле с напряженно-

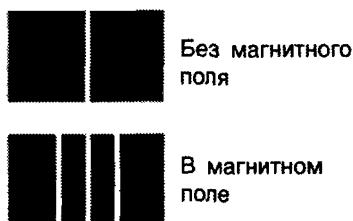


Рис. 3.6

стью H : $mv^2/r = kr + (e/c)vH$, где k — коэффициент квазиупругости. Считая, что $k = 4\pi^2mv_0^2$ и $v = 2\pi r\nu$, для частоты двух круговых движений он получил формулу: $\nu = \nu_0 \pm eH/4\pi mc$.

Вскоре выяснилось, что результат Лоренца является частным случаем теоремы английского физика Джозефа Лармора (*J. Larmor*, 1857–1942), которая была доказана в 1897 году. Согласно этой теореме влияние магнитного поля на вращающиеся заряженные частицы состоит в том, что на их орбитальное движение накладывается прецессия вокруг направления магнитного поля с угловой частотой $\omega_L = eH/2mc$. Эту частоту называют *ларморской частотой*.

Таким образом, Лоренц показал, что при наблюдении поперек магнитного поля линия излучения атома с частотой ω_0 расщепляется на три линии с частотами $\omega_0 - \omega_L$, ω_0 , $\omega_0 + \omega_L$ (рис. 3.6). Эти линии получили название — *лоренцевский триплет*. При наблюдении вдоль магнитного поля возникает дублет — средняя линия отсутствует.

Наблюдаемые линии излучения в продольном и поперечном направлениях имеют разную поляризацию. Триплетные линии поляризованы линейно. Смещенные линии дублета имеют круговую поляризацию в противоположных направлениях. Интересно, что вначале Зеeman ошибся в определении направления круговой поляризации в компонентах дублета и поэтому сделал неправильный вывод о том, что подвижные частицы в атоме заряжены положительно.

По счастью для теории Лоренца стечению обстоятельств Зеeman не смог разрешить уширенные линии натрия, но успешно разрешил уширенную синглетную линию кадмия λ 4800 на дублет при наблюдении в продольном направлении и триплет — в поперечном направлении. Однако, как показал опыт, триплетное (или дублетное) расщепление спектральных линий наблюдается далеко не всегда. Чаще возникает более сложная картина расщепления. Это называют *аномальным*, или *сложным эффектом Зеемана*. На рисунке 3.7 показано расщепление резкого триплета атома цинка на большое число компонентов. Впервые обнаружил аномальный эффект Зеемана английский физик Престон (*T. Preston*). В своем докладе Дублинскому Королевскому обществу в конце 1897 года он сообщил, что

Резкий триплет атома цинка



Рис. 3.7

«две линии натрия... не принадлежат к классу триплетов. На самом деле... одна из D-линий (D_2) представляет собой секстет из тонких ярких линий, т. е. образует резкие и одинаково интенсивные линии с двумя несколько менее резкими линиями по краям. Далее, другая D-линия (D_1) является квинтетом...». Вскоре такой же результат был получен в экспериментах французского физика Корню (*A. Cornu*). Начиная с 1898 года многочисленные попытки объяснения этого эффекта были безуспешными, пока не был открыт спин электрона.

В 1902 году Зеemannу и Лоренцу была присуждена Нобелевская премия за исследования влияния магнетизма на процессы излучения.

Пользуясь картиной пространственного квантования и теоремой Лармора о прецессии магнитного момента вокруг внешнего магнитного поля, Зоммерфельд, а также Дебай в 1916 году дали объяснение эффекта Зеemannа с квантовой точки зрения. Зоммерфельд писал: «Приложенное магнитное поле H не меняет форму орбиты, ее наклонение к направлению магнитного поля и движение по орбите, оно вызывает только равномерную прецессию орбиты вокруг направления магнитного поля с угловой скоростью $\Omega = eH / 2mc$. Условие справедливости этого положения требует только, чтобы скорость электрона, связанная с прецессией, была мала по сравнению со скоростью электрона на орбите без прецессии. Это для рассматриваемой атомной модели имеет место вплоть до самых сильных магнитных полей». Однако оказалось, что квантовый расчет Зоммерфельда и Дебая не объясняет сложного эффекта Зеemannа и приводит лишь к простой картине расщепления, как и в классических расчетах Лоренца. Так что, как писал Зоммерфельд, «В настоящее время квантовое рассмотрение эффекта Зеemannа дает те же результаты, что и теория Лоренца, но не более того. Оно может объяснить нормальный триплет..., но пока не в состоянии пролить свет на более сложные типы расщепления». Зоммерфельд говорил, что квантовые представления содержатся в формуле зеemannовского расщепления «в скрытом виде». А аномальный Зеemann-эффект еще немало будоражил умы физиков того времени.

Тщательные исследования эффекта Зеemannа в слабых и сильных магнитных полях проводили немецкие физики-экспериментаторы Фридрих Пашен (*F. Paschen*, 1865–1947) и Эрнст Бак (*E. Back*, 1881–1959). Они показали, что расщепление спектральных линий всегда пропорционально напряженности магнитного поля, оно имеет различный характер для синглетов, дублетов, триплетов и т. д. и зависит от того, является ли магнитное поле сильным или слабым. В слабом магнитном поле синглетные термы всегда дают лоренцевский триплет, а дублетные, триплетные и т. д. термы приводят к более сложной картине расщепления. С увеличением магнитного поля расщепленные линии вначале диффузно расплываются, а затем при достижении определенного значения магнитного поля, характерного

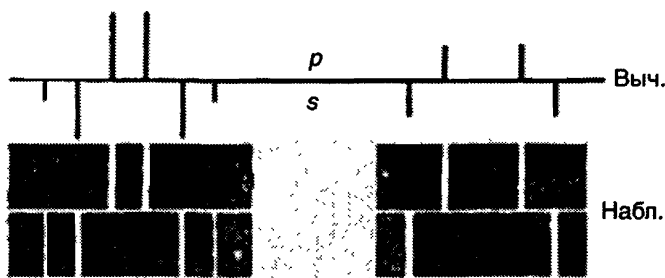


Рис. 3.8

для каждого элемента, они превращаются в обычный триплет Лоренца независимо от мультиплетности термов. Это явление, открытое Пашеном и Баком в 1912 году, называют *магнитооптическим превращением*, или *эффектом Пашена—Бака*.

По современным представлениям магнитное поле считается «слабым», если вызванное им расщепление мало по сравнению с естественным мультиплетным расщеплением термов; в противном случае магнитное поле является «сильным». Лишь в сильном магнитном поле происходит «нормальное» зеемановское расщепление спектральных линий. Ясно, что для синглетных термов любое магнитное поле является «сильным», поэтому для них всегда наблюдается простой эффект Зеемана.

Все особенности эффекта Зеемана были объяснены лишь после введения спина электрона. А до этого многие физики «ломали голову» над проблемой аномального эффекта Зеемана. Об этом ярко говорил Паули в 1946 году: *«Аномальный тип расщепления был особенно интересен тем, что хотя он и подчинялся красивым и простым законам, однако понять его было очень трудно, так как самые общие предположения об электро-не, исходящие как из классической, так и из квантовой теории приводили всегда к одному и тому же триплету. При более близком знакомстве задача показалась мне еще более неприступной. Коллега, встретивший меня, когда я бесцельно бродил по прекрасным улицам Копенгагена, дружески сказал: „Вы выглядите очень несчастным“. На что я пылко ответил: „Как может выглядеть человек счастливым, если он думает об аномальном эффекте Зеемана?“»* (Сб. *Теоретическая физика 20-го века*. Под. ред. М. Фирца и В. Вайскопфа. — М.: ИЛ, 1962). Лишь после открытия спина электрона удалось объяснить аномальное зеемановское расщепление. В частности, расчет аномального расщепления дублетной D -линии натрия прекрасно совпадает с обнаруженным Престоном и Корню ее расщеплением на 10 линий (рис. 3.8). Следует отметить, что еще в 1923 году немецкий физик Альфред Ланде (*A. Lande, 1888–1975*) нашел эмпирическую формулу, которая удивительно хорошо описывала сложную картину расщепления. Эта формула в дальнейшем получила полное теоретическое обоснование.

3.8. Опыты ШТЕРНА И ГЕРЛАХА

Опыты немецких физиков Отто Штерна (*O. Stern*, 1888–1969) и Вальтера Герлаха (*W. Gerlach*, 1889–1979), выполненные в 1921–1922 годах, относятся к ключевым экспериментам в физике (*Zeits. für Phys.* 8, S. 110, 1922; 9, S. 349, 1922). Их результаты в свое время Зоммерфельд рассматривал как непосредственное экспериментальное доказательство пространственной ориентации магнитного момента, который пропорционален моменту импульса. Зоммерфельд писал: «*Как обстоит дело с эмпирическим доказательством пространственного квантования? В первую очередь надо сказать, что, по сути дела, каждая картина зеемановского расщепления дает такое доказательство. Если даже модельное представление общего (аномального) эффекта Зеемана доставляет еще большие затруднения, то все же нет сомнений, что различные компоненты зеемановской картины соответствуют различным пространственным положениям магнитного момента атома... Правда, такое не совсем прямое доказательство менее убедительно для экспериментаторов, чем для теоретиков. Однако недавно было получено непосредственное экспериментальное доказательство ориентации магнитных моментов атомов серебра в магнитном поле. Эти опыты были выполнены в Германии Отто Штерном и Вальтером Герлахом.*

Штерн и Герлах пропускали пучок атомов серебра перпендикулярно сильно неоднородному магнитному полю (рис. 3.9). При классическом подходе следовало бы ожидать, что проекции магнитного момента (и момента импульса) этих атомов на направление магнитного поля непрерывно изменяются в пределах от минимального до максимального значения. Опыты показали, что проекции момента импульса атомов серебра имеют дискретные значения, конкретно два значения. По этому поводу Штерн и Герлах писали: «*Мы видим в этих результатах прямое экспериментальное доказательство квантования направления в магнитном поле.*» Они основывались на теории Зоммерфельда, согласно которой в основном состоя-

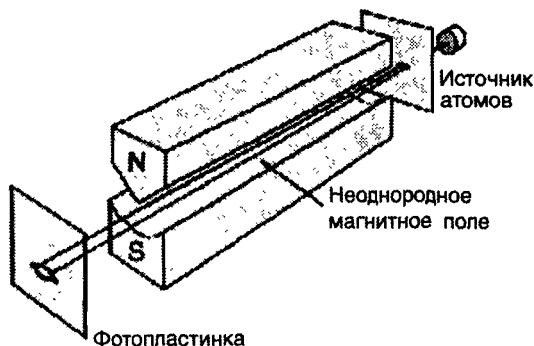


Рис. 3.9

нии атома серебра число проекций момента импульса на выделенную ось должно быть равно двум. Это, казалось бы, и подтверждается опытами Штерна и Герлаха.

Надо отметить, что это был первый эксперимент, не связанный с оптическими явлениями, излучением, который подтвердил квантовые представления. В связи с этим Зоммерфельд писал: «Своим смелым экспериментом Штерн и Герлах не только продемонстрировали существование пространственного квантования, они доказали атомистическую природу магнитного момента, его квантово-теоретическое происхождение и его связь с атомистической структурой электричества».

Однако впоследствии выяснилось, что такое понимание результатов опытов Штерна и Герлаха является ошибочным, поскольку теория Зоммерфельда была неправильной. На это впервые указали Эйнштейн и Эренфест в 1922 году (А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, Т. 3, с. 442). Это служит наглядным примером того, как иногда благодаря случайности эксперимент может подтверждать неправильные теоретические положения. Случайным в опытах Штерна и Герлаха был выбор атомов серебра. Если бы они взяли другое вещество, например, серу, то никакого согласия с теорией Зоммерфельда не было бы.

Действительно, основным состоянием атома серебра является s — состояние, для которого орбитальное квантовое число $\ell = 0$. Но в s — состоянии магнитный момент атомов, связанный с орбитальным движением электронов, отсутствует. Следовательно, никакого расщепления пучка атомов серебра не должно было бы происходить. Наблюдающееся же на опыте расщепление означает, что оно обусловлено не орбитальным движением электронов, а какими-то другими причинами. При правильном истолковании, своими опытами Штерн и Герлах открыли новую важную характеристику электрона — его спин. Спин, как и любой механический момент импульса, обладает теми же общими свойствами, что и вектор момента импульса орбитального движения. Для орбитального движения $|\ell|^2 = \hbar^2 \ell(\ell + 1)$, $\ell_z = m_\ell \hbar$:

Магнитное квантовое число, связанное с орбитальным движением, обозначено как m_ℓ . Оно принимает $2\ell + 1$ значений. Аналогично можно написать для спинового момента импульса $|\vec{s}|^2 = \hbar^2 s(s + 1)$, $s_z = m_s \hbar$. Здесь s —

спиновое квантовое число, m_s — магнитное спиновое квантовое число, которое принимает $2s + 1$ значений. С собственным механическим моментом импульса электрона связан его магнитный момент.

Наблюдающееся в опытах Штерна и Герлаха расщепление пучка атомов, находящихся в s -состоянии, вызвано, таким образом, спиновым магнитным моментом электрона (магнитный момент ядер атомов оказывается

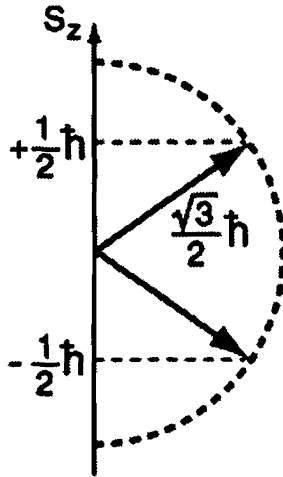


Рис. 3.10

мало существенным). Согласно этим опытам, число проекций магнитного спинового момента равно двум, т. е. $2s + 1 = 2$.

Отсюда следует важный вывод, что спиновое квантовое число имеет полуцелое значение: $s = \frac{1}{2}$, $m_s = \pm \frac{1}{2}$. Следовательно, для спина электрона

$|\vec{s}|^2 = \frac{3}{4}\hbar^2$, $s_z = \pm \frac{\hbar}{2}$. В этом состоит своеобразие вектора спина электрона (рис. 3.10): он характеризуется полуцелым значением квантового числа. Часто спиновое квантовое число s также называют *спином*.

3.9. ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ И СПИН ЭЛЕКТРОНА

В точных спектроскопических измерениях было обнаружено, что спектральные линии атома водорода и атомов щелочных металлов расщеплены на две близко расположенные линии. В частности, дублетную структуру желтой D — линии атома натрия можно наблюдать с помощью простейших спектроскопических приборов, поскольку это расщепление довольно велико — 6 \AA . Это называется *тонкой структурой* спектральных линий (и термов). Наблюдение показало, что в спектрах щелочно-земельных металлов имеются линии, состоящие из трех близко расположенных линий. Это *триплеты*. Есть также спектральные линии, которые не имеют структуры. Это *синглеты*. В спектрах элементов третьей группы наблюдаются линии, имеющие структуру *дублетов* и *квартетов*, и т. д. Зоммерфельд

впервые частично объяснил тонкую структуру термов, учтя релятивистские эффекты при движении электрона в атоме. Он ввел величину — *постоянную тонкой структуры* $\alpha = e^2 / \hbar c \approx 1/137$, которая играет важную роль в атомной физике.

Для объяснения тонкой структуры спектральных линий Зоммерфельд ввел в 1920 году третье квантовое число j , которое он назвал *внутренним квантовым числом*. Зоммерфельд предположил, что полный момент импульса атома является векторной суммой орбитального момента импульса электрона и момента импульса *атомного остова* (ядра атома): $\vec{j} = \vec{\ell} + \vec{s}$. Атомному остову приписывалось квантовое число s , так что внутренне квантовое число принимало все значения от $j = \ell + s$ до $|\ell - s|$. Для объяснения дублетной структуры термов щелочных металлов считалось, что число $s = 1/2$. Таким образом, компоненты дублета определяются числами $j = \ell - 1/2$ и $j = \ell + 1/2$.

Для интерпретации спектров щелочно-земельных элементов предполагалось, что для внутреннего квантового числа имеется три возможности: $j = \ell - 1, \ell, \ell + 1$. Эти идеи были распространены на более сложные атомы.

Однако, как показал выдающийся немецкий физик Вольфганг Паули (*W. E. Pauli*, 1900–1958), предположение о том, атомный остов обладает моментом импульса s , находится в противоречии с тем, что наблюдается для эффекта Зеемана — иначе эффект должен был бы зависеть от атомного номера элемента.

Вольфганг Эрнст Паули после обучения в Венском университете продолжил свое образование в Мюнхенском университете у Зоммерфельда. Изучая аномальный эффект Зеемана, он фактически открыл спин электрона, а тщательный анализ спектров сложных атомов привел его в 1925 году к формулировке принципа запрета, за который он был удостоен Нобелевской премии в 1945 году. В 1931 году он высказал гипотезу о существовании нейтрино, а в 1940 году доказал теорему о связи статистики со спином и показал, что частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми—Дирака.

Паули предположил, что момент импульса s связан с новым квантово-теоретическим свойством электрона, которое Паули называл «*двузначностью, не описываемой классически*». Он поразительно близко подошел к открытию спина электрона, но так и не сделал решающего определенного шага в этом направлении. Паули приписал квантовое число s самому оптическому электрону. Таким образом, согласно Паули, состояния электрона должны характеризоваться четырьмя квантовыми числами: главным



Паули

квантовым числом n , орбитальным квантовым числом ℓ , внутренним квантовым числом j и магнитным квантовым числом m_j , принимающим $2j + 1$ значений от $-j$ до $+j$. В 1924 году, когда Паули показал несостоятельность общепринятой в то время теории остова, была опубликована классическая статья английского физика Эдмунда Стонера (*E. C. Stoner*, 1899–1968) «Распределение электронов по атомным уровням» (*Phil Mag.* 48, p. 719–726, 1924). О важном стимулирующем значении этой статьи Паули говорил в своей Нобелевской лекции:

«...появилась работа английского физика Стонера, содержащая наряду с улучшением классификации электронов в подгруппах следующее существенное замечание: при заданной величине главного квантового числа число энергетических уровней отдельного электрона в спектрах щелочных металлов во внешнем магнитном поле равно числу электронов в замкнутой оболочке инертных газов, соответствующей этому главному квантовому числу. Тогда на основе моих прежних результатов по классификации спектральных термов в сильном магнитном поле для меня прояснилась общая формулировка принципа запрета. Основную мысль можно высказать так: сложные числа электронов в замкнутых подоболочках сводятся к простому числу 1, если классификация оболочки проводится с помощью 4-х квантовых чисел при условии, что снимается всякое вырождение. Вообще невырожденный уровень является уже „заполненным“, если он занят одним-единственным электроном; состояния, противоречащие этому постулату, запрещаются. Эта общая формулировка принципа запрета была опубликована в Гамбурге весной 1925 года после того, как во время посещения Тюбингена мне удалось подтвердить с помощью имевшихся там спектроскопических данных некоторые дополнительные следствия относительно аномального эффекта Зеемана в более сложных атомах. Физики, кроме специалистов по классификации спектральных термов, считали принцип запрета малопонятным, поскольку четвертая степень свободы электрона не описывалась никакой моделью».

В 1925 году молодые в то время голландские физики Джордж Уленбек (*G. Uhlenbeck*, 1900–1988) и Сэмюэл Гаудсмит (*S. Goudsmit*, 1902–1979) предложили наглядную модель, объясняющую наличие собственного магнитного момента электрона его вращением вокруг собственной оси. Предполагая, что электрон имеет форму шара, и заряд его равномерно распределен по поверхности, они нашли, что отношение магнитного момента вращающегося электрона к его моменту импульса вдвое больше, чем в случае орбитального движения электрона. Это соответствовало результатам опытов Штерна и Герлаха. Однако такое наглядное истолкование спина электрона является неверным, поскольку простой расчет показывает, что в этом случае скорость частей электрона на его экваторе значительно превышает скорость света. Паули, вероятно, знал этот недостаток модели. Он говорил:

«...мои прежние сомнения, а также осторожное выражение „двузначность электрона, не поддающаяся классическому описанию“, в дальнейшем получили известное подтверждение, так как Бор показал с помощью волновой механики, что спин электрона нельзя измерить в классически описываемых опытах, и поэтому спин следует рассматривать как существенно квантово-механическое свойство электрона».

Гипотеза Уленбека и Гаудсмита была опубликована в 1925 году в статье «Замена гипотезы немеханического „натяжения“ требованием, относящимся к внутреннему поведению атома». Интересна история этой публикации. Свои предварительные расчеты Гаудсмит и Уленбек показали Эренфесту, который тут же рекомендовал их статью к опубликованию. Однако, ознакомившись с неутешительными оценками, которые провел Лоренц, они в панике пришли к Эренфесту, чтобы забрать свою статью. Эренфест ответил, что статья уже находится в печати, и добавил: *«Вы оба достаточно молоды, чтобы позволить себе сделать глупость».*

Надо сказать, что идея о собственном вращении электрона не была, в общем, нова. Еще в 1921 году Артур Комптон осторожно высказывался о возможности собственного вращения электрона, которое он, однако, не связал с особенностями эффекта Зеемана, и эта идея осталась незамеченной. Комптон писал: *«...сам электрон, вращающийся подобно миниатюрному гироскопу, по-видимому, является первичной магнитной частицей».* В самом начале 1925 года подобную идею высказывал нидерландский физик Ральф Крониг (*R. Kronig*, 1904), но, не получив поддержки, он не стал публиковать свои результаты. Школа Бора объясняла всю совокупность явлений, связанных с тонкой структурой спектров и расщеплением спектральных линий в магнитном поле, с помощью гипотезы о некотором «немеханическом натяжении», приводящим к удвоению термов.

Паули в 1925 году приписал самому электрону четвертое квантовое число, но не указал смысла этой характеристики в модели атома. Уленбек и Гаудсмит сопоставили четырем квантовым числам четыре степени свободы электрона и выдвинули идею о внутреннем моменте количества движения и магнитном моменте, равным одному магнетону Бора. Однако они не раскрыли связи магнетона Бора с орбитальным движением. Лишь после того, как с помощью идей Эйнштейна они вывели формулу для дублетного расщепления с множителем 2 и применили ее к атому водорода, Бор, а за ним и другие, признали гипотезу о спине электрона. В 1926 году Бор писал: *«Когда я приехал в Лейден, ... Эйнштейн спросил меня, ... что я думаю о вращающемся электроне. На мой вопрос о причине взаимодействия направления спина с орбитальным движением он ответил, что это взаимодействие является непосредственным следствием теории относительности. Его замечания были для меня полным откровением, и с тех пор я никогда не сомневался, что нашим затруднениям пришел конец».*

Бор, признав критику своей теории «немеханического натяжения», писал: *«В моей статье была высказана та точка зрения, что упомяну-*

тые трудности неотъемлемо связаны с ограниченными возможностями описать стационарные состояния атома механической моделью. Представляется, однако, что положение здесь несколько изменилось благодаря введению гипотезы о вращающемся электроны, которая, несмотря на неполноту заключений, могущих быть извлеченными из моделей, обещает быть желанным дополнением к нашим представлениям о структуре атома... В самом деле, она открывает перед нами многообещающие возможности для более широкого объяснения свойств элементов с помощью механических моделей, по крайней мере, на качественном уровне, характерном для применений принципа соответствия» (Н. Бор. Избр. труды, т. 2, с. 25).

В 1927 году Паули включил спин электрона в формальный аппарат нерелятивистской квантовой механики. Последовательный учет спина электрона проводится в квантово-релятивистской теории, созданной Дираком в 1928 году.

3.10. ОБЪЯСНЕНИЕ БОРА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

После блестящего успеха теории Бора в объяснении многих фактов он попытался на языке этой теории интерпретировать периодическую систему элементов, используя химические и спектроскопические данные своего времени. Об этом Бор сделал доклад в 1921 году в Физическом обществе в Копенгагене. Он к ядру с зарядом Ze прибавлял последовательно Z электронов, располагая их по различным орбитам, «при этом приходится ставить вопрос так: как может быть образован атом при последовательном присоединении и связывании отдельных электронов в силовом поле ядра?»

Еще Ридберг заметил, что периоды таблицы Менделеева 2, 8, 18, 32 могут быть получены из простой формулы $2n^2$, если полагать $n = 1, 2, 3, 4$. На самом деле периоды равны 2, 8, 8, 18, 18, 32. Чтобы понять это, необходимо рассмотреть периодическую систему элементов подробнее.

Орбиту электрона с главным квантовым числом n и азимутальным квантовым числом k Бор обозначал как n_k . В атоме водорода электрон находится на орбите 1_1 (в современных обозначениях это состояние $1s$). Атом гелия является химически инертным, поэтому можно думать, что его два электрона вращаются по круговым орбитам 1_1 , образуя симметричную комбинацию. Состояния с $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ по аналогии с рентгеноскопическими обозначениями назывались K -, L -, M -, N -, O -, P -оболочками. По своим химическим и оптическим свойствам литий помещается в таблице под водородом. Два электрона в литии, так же как и в гелии, находятся в K -оболочке; третий валентный электрон, слабее связанный с ядром, помещается в L -оболочку на орбиту 2_1 (в состоянии $2s$). Для углерода с $Z = 6$ Бор исходит из его тетраэдрически направленной валентности и рас-

полагает 4 добавочных электрона в L -оболочке по четырем орбитам 2_1 , плоскости которых перпендикулярны пространственным диагоналям тетраэдра. Такое расположение всех четырех электронов в состоянии $2s$ противоречит принципу Паули, но в то время он был неизвестен. Порядок заполнения электронных оболочек без учета принципа Паули, конечно, является неправильным, поэтому мы не будем излагать дальнейших рассуждений Бора. Отметим только, что Бор совершенно справедливо поставил калий на 19 место. Он специально отмечал, что на энергию валентного электрона щелочного металла (Li, Na, K, \dots), движущегося по вытянутому эллипсу, оказывает влияние то, что при его приближении к ядру электрон проникает в замкнутую электронную оболочку, окружающую ядро, и взаимодействует с ней, а на больших расстояниях от ядра валентный электрон взаимодействует с полем экранированного заряда ядра $(Z-1)e$. Это приводит к тому, что энергия оптически активного валентного электрона зависит не только от главного квантового числа (как в случае атома водорода), но и от азимутального квантового числа. В общем, состояние n_k может обладать меньшей энергией, чем состояние n'_k , если $n > n'$ и $k < k'$. Именно это происходит в случае атома калия ($Z = 19$), начинающего 4-ый период.

Еще не зная важных квантовых закономерностей, которые были открыты позднее, Бор все же уверенно дал «...объяснение характерным отклонениям от простой периодичности в системе элементов» и проследил, в частности, «образование семейства редкоземельных элементов». Он пришел к выводу, что 72-ой элемент по своим свойствам относится не к ряду редкоземельных элементов, как в то время ошибочно считал французский физик Александр Довийе (*A. Dauwillier*), а является аналогом циркония. В конце 1922 года нидерландский физик Дирк Костер (*D. Coster*, 1889–1950) и венгерский физик Дьердь Хевеши (*G. Hevesy*, 1885–1966) действительно обнаружили в циркониевых рудах новый элемент с порядковым номером 72 в периодической системе элементов. Это стало очередной блестящей победой теории Бора. Новый элемент получил имя *гафний* в честь древнего названия столицы Дании.

Исследования Бора о распределении электронов в подгруппах у атомов в периодической системе элементов сыграли важную роль в открытии *принципа запрета*. Конечно, в то время Бор не знал этого принципа, но вполне справедливо задавался вопросом, почему все электроны атома не сосредотачиваются в состоянии с наименьшей энергией, т. е. на K — оболочке. По этому поводу Паули впоследствии говорил: «... существенный прогресс, который был в то время достигнут благодаря исследованиям Бора, состоял в объяснении (на основе сферически-симметричной атомной модели) образования промежуточных оболочек атома и общих свойств редкоземельных элементов. Вопрос о том, почему все электроны атома в основном состоянии не находятся в самой внутренней оболочке, уже в ранних работах выделялся Бором как имеющий фундаментальное значе-

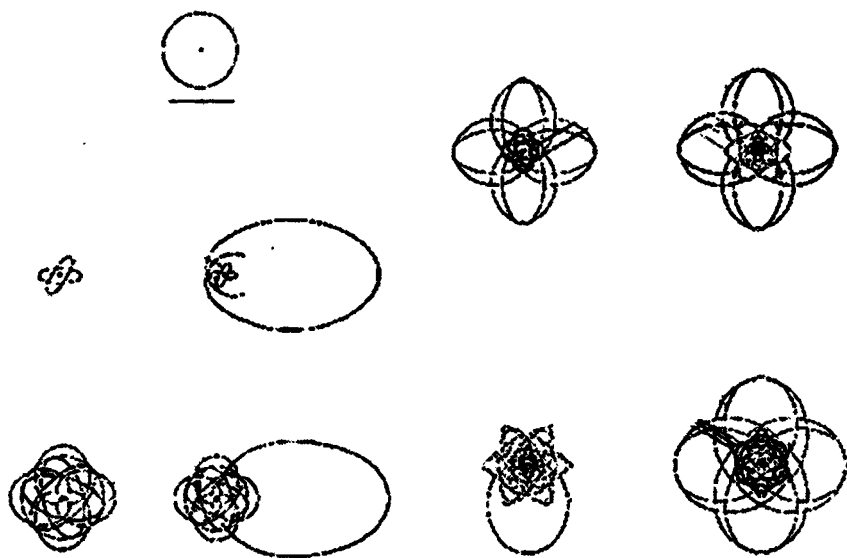


Рис. 3.11. Орбиты вращения электронов в атомах некоторых элементов

ние. В своих геттингенских лекциях он в частности рассмотрел заполнение самой внутренней K — оболочки атома гелия и существенную связь этого с двумя отдельными спектрами гелия — орто- и парагелиевыми спектрами. На основе классической механики нельзя было дать сколько-нибудь убедительного объяснения этого явления. На меня произвело сильное впечатление то, что Бор — и в то время, и в последующих дискуссиях — искал общее объяснение, которое было бы справедливо для заполнения любой электронной оболочки...» (В. Паули. Физические очерки. М.: Наука, 1975).

По теории Бора электроны в атомах считались вращающимися по вполне определенным орбитам, характерным для каждого атома (рис. 3.11). И хотя в действительности никаких орбит электронов в атомах не существует, изображения орбит электронов в атомах нередко использовались как символ XX-го «атомного века».

3.11. НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТЬ ТЕОРИИ БОРА

Теория Бора совместно с принципом соответствия позволила разобраться в огромном количестве экспериментальных фактов, объяснить многочисленные явления и она по праву считалась прекрасной теорией своего

времени. Оценивая теорию Бора, Резерфорд в 1931 году говорил: *«Я считаю первоначальную квантовую теорию спектров, выдвинутую Бором, одной из самых революционных из всех когда-либо созданных в науке, и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех».*

Так же высоко оценивал теорию Бора Эйнштейн: *«...Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля, и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это мне кажется чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли».*

Приведем еще слова Планка: *«...новые идеи Бора открывают нам вполне соответствующий путь в глубь открытой им страны чудес».*

Тем не менее, несмотря на непосредственное экспериментальное подтверждение постулатов Бора, и успехов его теории в объяснении многочисленных экспериментальных фактов, в период с 1919 по 1925 годы стали все яснее проявляться трудности и недостатки этой теории. Теория описывала главнейшие свойства атомов, но смысл правил квантования оставался загадочным. Не зря Бор называл их постулатами, т. е. недоказанными предположениями. Их смысл стал ясен только после создания последовательной квантовой механики. Теория Бора оказалась фактически лишь теорией атома водорода и водородоподобных атомов. Попытки обобщения теории на случай даже следующего атома в периодической системе — атома гелия — ни к чему положительному не привели. Кроме того, по теории Бора можно было вычислить далеко не все физические величины. Даже в случае атома водорода можно было рассчитать частоты (или длины волн) спектральных линий, и не существовало общего принципа вычисления яркости или интенсивности этих линий. Для этой цели вводились дополнительные предположения, основанные на принципе соответствия — этой *«волшебной палочки»*, как говорил Зоммерфельд. Все это, как с огорчением отмечал Бор, превратило его теорию *«почти в интуитивное угадывание истинных отношений».* Оказалось также, что модель атома Бора является динамически неустойчивой. Это показал нидерландский физик Хендрик Крамерс (*H. Kramers*, 1894–1952). Он исследовал такое движение электронов в атоме Бора, в котором мгновенное положение и скорость немного отличаются от их значений, соответствующих действительному движению. Оказалось, что эти малые отклонения нарастают со временем. Это и означает, что действительное движение является неустойчивым. Период с 1919 по 1925 годы называли периодом «систематического угадывания» на основе принципа соответствия. В 1924 году Зоммерфельд пророчески пи-

сал: «С помощью своего принципа соответствия Бор пытается тесно увязать квантовую теорию с классической теорией излучения. Он действует по возможности индуктивно и на основе физических соображений, сопоставляя постепенно каждому квантовому числу период некоторого движения. Волшебная сила принципа соответствия полностью оправдалась при выводе правил отбора квантовых чисел, при рассмотрении сериальных и полосатых спектров. Принцип стал путеводной нитью для всех новых открытий Бора и его школы. Несмотря на это, я не могу считать его окончательно удовлетворительным уже из-за того, что в нем смешаны классические и квантовые точки зрения. Мне хотелось бы увидеть принцип соответствия как особо важное следствие будущей дополненной квантовой теории, а не как ее основание». Это было сказано буквально накануне создания квантовой механики!

По существу теория Бора еще не была настоящей теорией, а фактически представляла собой набор постулатов, которые сочетали в себе явно непримиримое — классическую непрерывность (вращение на орбитах) и квантовые скачки. К тому времени появились новые экспериментальные факты, которые никак не могла объяснить теория Бора. Нужны были новые идеи, новые представления. Такие идеи были вскоре высказаны и разработаны де Бройлем, Гейзенбергом, Паули, Дираком, Шредингером, Борном, Йорданом, Бором, благодаря которым была создана современная квантовая теория. Эта теория является основой физики атомов и молекул.

...высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция.

Альберт Эйнштейн

ГЛАВА 4 ✦ СОЗДАНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

4.1. «ВОЛНЫ МАТЕРИИ»

Физики только-только начали осмысливать проблему корпускулярно-волнового дуализма света, как в 1923 году французский физик Луи де Бройль (*Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie*, 1892–1987), что называется, подлил масла в огонь и усугубил эту проблему. Он высказал, казалось, если не сумасшедшую, то довольно странную идею.

Луи де Бройль происходил из знатного рода Франции. По своему образованию он был историком, а физикой стал заниматься после того, как в 1919 году оставил военную службу. Вначале он работал в лаборатории своего старшего брата Мориса, занимавшегося рентгеновским излучением, а затем его научным руководителем стал известный физик Поль Ланжевен (*P. Langevin*, 1872–1946). Луи де Бройль — один из основателей современной квантовой механики. Его работы относятся к классической и квантовой механике, теории поля, квантовой электродинамике, истории и методологии физики. В 1927 году он дал интерпретацию квантовой механики на основе представлений о волне-пилоте.

В сентябре 1923 года Луи де Бройль в журнале *Comptes Rendus* (v. 177, p. 507; перевод: УФН, 93, с. 178, 1967) опубликовал результаты своих исследо-



Де Бройль

ваний, которые в дальнейшем стали основой современной квантовой теории. Полностью восприняв идею Эйнштейна о корпускулярно-волновом дуализме света, Луи де Бройль пришел к мысли, что частицы, например, электроны, аналогично квантам света, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Такая мысль могла возникнуть при глубоком анализе известной оптико-механической аналогии. Она заключается в том, что уравнения движения материальной частицы в форме Гамильтона—Якоби совершенно аналогичны уравнениям распространения луча света без учета его волновых свойств. Это доказал еще в 1834 году ирландский математик и физик Уильям Гамильтон (*W. Hamilton*, 1805–1865). В своей первой работе де Бройль писал: *«История оптических теорий показывает, что научные взгляды долгое время колебались между механической и волновой концепцией света, однако эти две точки зрения, вероятно, менее противоречат одна другой, чем думали ранее»*. Квант света — фотон отличается от других частиц, например, электронов, только тем, что его масса равна нулю. Но это различие вряд ли является принципиальным. Поэтому де Бройль пришел к мысли, что корпускулярно-волновой дуализм — не исключительное свойство света, а общее свойство материи. Свои размышления по этому поводу он изложил следующим образом: *«Соотношение Эйнштейна между частотой и энергией, введенное им на основе его теории фотонов, ясно показало, что этот дуализм излучения неразрывно связан с самим существованием квантов. Тогда возникает законный вопрос, не связан ли этот странный дуализм волн и частиц, примером которого так замечательно и несомненно явился свет, с глубокой и скрытой природой кванта действия? Не следует ли ожидать, что двойственность такого типа обнаружится всегда, где только появляется постоянная Планка? Но тогда почти сам собой возникает вопрос: поскольку свойства электрона в стационарном состоянии атома описываются с помощью кванта действия, не можем ли мы предположить, что и электрон так же двойствен, как и свет? На первый взгляд, такая идея показалась очень дерзкой. Ведь мы всегда представляли себе электрон в виде электрически заряженной материальной точки, которая подчиняется законам классической динамики (улучшенным в некоторых случаях релятивистскими поправками, которые ввел Эйнштейн). Электрон никогда явно не проявлял волновых свойств, таких, скажем, какие проявляет свет в явлениях интерференции и дифракции. Попытка приписать волновые свойства электрону, когда этому нет никаких экспериментальных доказательств, могла выглядеть как ненаучная фантазия. И тем не менее, как только возникла идея, что электрон, возможно, обладает такими свойствами, и не только электрон, но и вообще материальные частицы, так в голову начали приходиться разные беспокойные соображения»*. Большую роль в возникновении своей идеи Луи де Бройль отводил беседам со своим братом Морисом. Об этом де Бройль писал в 1963 году: *«Мой брат*

считал рентгеновские лучи некоей комбинацией волны и частицы, но, не будучи теоретиком, он не имел особенно четких представлений об этом предмете... Он настойчиво обращал мое внимание на важность и несомненную реальность дуальных аспектов волны и частицы. Эти долгие беседы... помогли мне глубоко понять необходимость обязательной связи волновой и корпускулярной точек зрения».

Де Бройль отмечал, что «истинным предшественником волновой механики» был французский физик Марсель Бриллюэн (*M. Brillouin*, 1854–1948). В ряде своих работ 1919–1922 годов Бриллюэн рассматривал периодические движения колеблющейся частицы в упругой среде. Он показал, что если скорость движения частицы по орбите намного превосходит скорость упругих волн в среде, то с каждым данным положением частиц можно связать конечное число n предшествующих положений, в которых частицу достигают n упругих волн, возбужденных частицей в эти предшествующие положения. Эти соображения Бриллюэн пытался применить к боровской модели атома.

Диссертацию де Бройля «Исследования по теории квантов» Ланжевен в декабре 1924 года послал на отзыв Эйнштейну. Как вспоминал впоследствии Макс Борн, Эйнштейн говорил ему по поводу этой работы: «Прочтите ее! Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно».

Свою идею де Бройль обосновал так: частице с массой покоя m_0 , неподвижной в сопутствующей системе отсчета, де Бройль приписал некий колебательный в пространстве процесс вида $\psi = A \sin 2\pi\nu_0 t$, где частота ν_0 определяется из условия, что энергия покоя частицы равна энергии кванта этого процесса: $m_0 c^2 = h\nu_0$. Наблюдатель, относительно которого частица движется с постоянной скоростью v вдоль оси — x' , будет воспринимать ее как «фиктивную волну, связанную с движущимся телом» $\psi' = A' \sin 2\pi\nu(t' + x'/u)$, где u — фазовая скорость волны. Со-

гласно теории относительности время $t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. Поскольку фаза

волны является релятивистским инвариантом, то легко видеть, что частота волны $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, а ее фазовая скорость оказывается больше скорости света $u = c^2 / v$. По общему определению длина волны равна:

$$\lambda = u / \nu = \frac{(c^2 / v)(1 - v^2/c^2)^{1/2}}{\nu_0} = \frac{h}{m_0(1 - v^2/c^2)^{-1/2}} = \frac{h}{p},$$

где $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ — релятивистский импульс частицы.

Таким образом, де Бройль пришел к выводу: «что, быть может, каждое движущееся тело сопровождается волной и что невозможно разделить движение тела и распространение волны». (УФН, 122, с. 562, 1977). Каждой движущейся частице с импульсом p сопоставляется волна, длина волны которой определяется формулой $\lambda = h / p$. Это соотношение является релятивистски-инвариантным. Такую волну называют волной де Бройля, или волной материи. Сам де Бройль говорил о «фазовых волнах». По существу формула для длины волны де Бройля является обращенной по отношению к известной формуле для импульса фотона: $p = hv / c = h / \lambda$. Эта формула явно отражает корпускулярно-волновой дуализм. В самом деле, длина волны является волновой характеристикой, а импульс — характеристикой частицы. Так что волновому процессу с длиной волны λ отвечает частица с импульсом p и, наоборот, частице с импульсом p отвечает волна с длиной волны λ . Волновые свойства движущейся частицы описываются с помощью волновой функции ψ . По общему определению

$$\text{групповой скорости волны } v_g = \frac{dv}{d(1/\lambda)} = \frac{dv/dv}{d(1/\lambda)/dv} = v. \text{ Отсюда следует,}$$

что групповая скорость волны де Бройля совпадает со скоростью частицы. Это очень важно, потому что именно с групповой скоростью волны переносится ее энергия.

Идея де Бройля о волнах материи позволила разъяснить смысл условия квантования Бора: по Бору момент импульса электрона на боровской орбите принимает значения, кратные «перечеркнутой» постоянной Планка: $pr = n\hbar$. Отсюда следует: $2\pi r = nh / p = n\lambda$. Левая часть этого равенства представляет собой длину боровской окружности. Таким образом, де Бройль открыл неожиданно простой смысл условия боровского квантования орбит: на длине n -ой орбиты должно укладываться целое число длин волн де Бройля. Это значит, что на боровской окружности волна де Бройля замыкается сама на себя. По этому поводу физики в то время со смехом говорили, что по де Бройлю электрон на боровской орбите «сам себя ловит за хвост».

Де Бройль указал, что траекторию частицы в силовом поле можно вычислить с помощью принципа Ферма, «как в среде с переменным показателем преломления»: $\delta \int \frac{ds}{\lambda} = \delta \int \frac{v ds}{u} = 0$. Тем самым, как писал де Бройль,

«пролит свет на фундаментальную связь, объединяющую два великих принципа — геометрической оптики и динамики». Таким образом, согласно де Бройлю траектория частицы должна определяться по принципу Ферма—Мопертюи. Если же частица проходит через отверстие или щель, размеры которых сравнимы с длиной волны де Бройля, то траектория частицы искривляется в соответствии с дифракцией волн. Так де Бройль пришел к

выводу: «лучок электронов, проходящий сквозь достаточно узкое отверстие, должен испытать дифракцию».

Эйнштейн сразу поддержал работу де Бройля, считая, что она «заслуживает всяческого внимания». Он писал: «Можно полагать, что каждому движению соответствует волновое поле, подобно тому, как в оптике волновое поле излучения соответствует движению световых квантов. Это волновое поле — пока еще неизвестной физической природы — в принципе должно оказывать свое влияние на движение... Думаю, что здесь речь идет не только о простой аналогии». Идеи де Бройля воспринял также Бор, который стал самым последовательным приверженцем идеи корпускулярно-волнового дуализма. Среди тех, кто с самого начала поддержал идеи де Бройля, был Ланжевен. Вместе с тем, конечно, не все физики того времени воспринимали идею де Бройля о волнах материи. Среди них был Планк, а Лоренц отреагировал так: «Эти молодые люди считают, что отбрасывать старые понятия в физике чрезвычайно легко!».

Историки науки, например, Ф. Хунд (История квантовой теории. Киев: Наукова думка, 1980) задаются вопросом: «почему корпускулярно-волновой дуализм так поздно был распространен на вещество?» Ведь идею о корпускулярно-волновом дуализме света Эйнштейн выдвинул еще в 1905 году! Мы видели, как относились физики к этой гипотезе в течение длительного времени, а Эйнштейн, видимо поглощенный создаваемой им теорией тяготения, не догадался обобщить соотношения для фотонов $E = \hbar\omega$, $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ на волны вещества. Но если бы он и высказал эти идеи в то время, то, можно не сомневаться, это привело бы к еще большему их отторжению.

4.2. КАК БЫЛА ДОКАЗАНА ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ

Высказанные де Бройлем идеи явились плодом⁸ его теоретических исканий и не были связаны с каким-либо экспериментом. Однако сам де Бройль глубоко верил в их справедливость и даже предполагал, как это может быть доказано. Уже в своих первых работах он писал: «Поток электронов, проходя через очень тонкую щель, должен был бы дать явление интерференции. Именно таким путем, по-видимому, нужно будет искать опытное подтверждение наших идей». Простой расчет показывает, что длина волны де Бройля для электрона, обладающего энергией 150 эВ, равна 10^{-8} см = 1 Å. Это — диапазон мягкого рентгеновского излучения. Отсюда следовало, что для выявления волновых свойств электрона необходимо пользоваться теми же методами, с помощью которых была доказана волновая природа рентгеновского излучения. На самом деле существование волновых свойств электрона было доказано в какой-то мере случайно «из-за недостатка проникаемости и избытка везения», как впоследствии говорил американский физик Клинтон Дэвиссон (Clinton Joseph

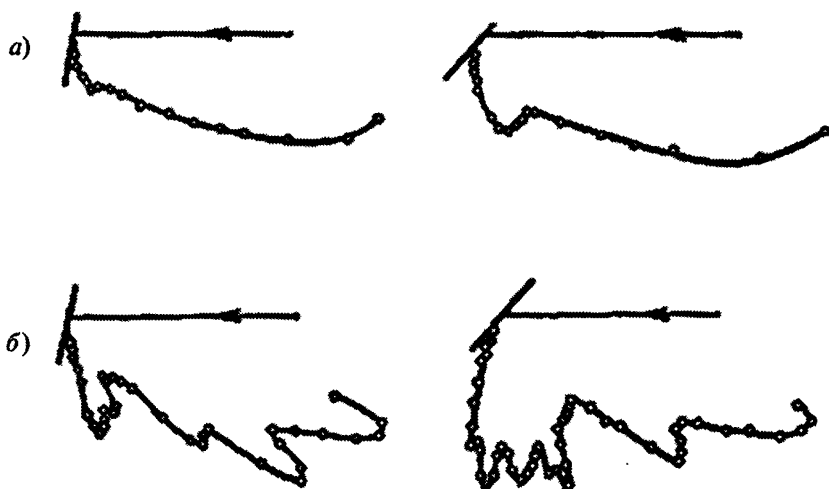


Рис. 4.1

Davisson, 1881–1958), под руководством которого проводились первые эксперименты такого рода. Дэвиссон со своим сотрудником Кансманом (*C. H. Kunsman*) в лаборатории Бэлл-Телефон в 1921–1923 годах изучал процессы отражения электронов от твердых тел, в частности, от пластинок никеля, чтобы исследовать конфигурацию электрического поля, окружающего отдельные атомы, и чтобы обнаружить в них электронные оболочки. В условиях их экспериментов регистрировались только те рассеянные электроны, которые проникали в металл на небольшую глубину и рассеивались однократно.

При некоторых углах рассеяния они наблюдали максимумы электронной интенсивности (рис. 4.1а). Эти максимумы они объясняли влиянием конфигурации атомных электрических полей. В своей статье о результатах проведенных опытов (*Science*, 54, p. 522, 1921) Дэвиссон и Кансман писали: «Все главные характеристики кривых распределения, наблюдавшихся к настоящему времени для рассеяния на никеле, по видимому можно объяснить с помощью предположения, что небольшая доля налетающих электронов фактически проникает через одну или несколько электронных оболочек, которые, как предполагается, составляют внешнюю часть атома никеля, и, описав простые орбиты в дискретном поле, вылетают без заметной потери энергии».

Джеймс Франк (*J. Franck*, 1882–1964) и Вальтер Эльзассер (*W. Elsasser*, 1904) в Геттингенском университете в Германии провели тщательный анализ этих результатов, и показали, что такое объяснение нельзя считать правильным. По расчетам Франка и Эльзассера наблюдавшиеся максимумы слишком велики, если предполагать, что они связаны с неоднородно-



Дэвиссон и Джермер

стью электрических полей около атомов металла. Они заметили, что с увеличением скорости налетающих электронов максимумы в угловом распределении отраженных электронов сдвигаются к направлению первичного пучка. Другими словами, картина рассеяния электронов оказывается очень похожей на картину дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. Вскоре они высказали мысль, что наблюдавшиеся максимумы при «рассеянии» электронов обусловлены их дифракцией в соответствии с гипотезой де Бройля. Эльзассер объяснил также странные в то время экспериментальные результаты немецкого физика Карла Рамзауэра (*C. Ramsauer*, 1879–1955), проводившего исследования сечения рассеяния медленных электронов (с энергией меньше 25 эВ) на благородных газах. Измерения Рамзауэра показали, что сечение уменьшается так, как будто атом становится совершенно прозрачным для электронов (*Ann. der Phys.* 64, S. 513, 1921; 72, S. 345, 1923). Аналогичные результаты получил также английский физик Джон Таунсенд (*J. Townsend*, 1868–1957). Такой эффект стали называть *эффектом Рамзауэра—Таунсенда*. Эльзассер пришел к выводу (июль 1925 г.), что этот эффект можно объяснить интерференцией волн де Бройля.

Однако Дэвиссон не придал значения объяснениям Франка и Эльзассера.

Все решил счастливый случай. Во время одного из опытов, которые проводил Дэвиссон с другим своим сотрудником — Лестером Джермером (*L. Germer*, 1896–1971) в феврале 1925 года, «в тот момент, когда мишень имела высокую температуру, взорвался сосуд с жидким воздухом; трубка, с которой велись эксперименты, была разбита, и ворвавшийся воздух сильно окислил мишень. В конечном счете окись была восстановлена,

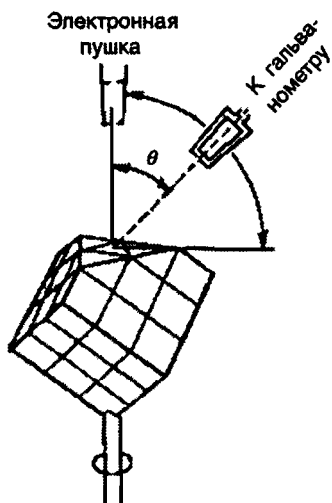


Рис. 4.2

а с помощью испарения удален поверхностный слой мишени, но для этого потребовалось длительное нагревание при различных высоких температурах в атмосфере водорода и в вакууме».

В результате такой обработки в пластинке никеля образовалось некоторое количество крупных кристаллов. Когда на пластинку снова направили пучок электронов, то кривая, показывающая зависимость интенсивности рассеянных электронов от угла рассеяния, существенно изменилась: число максимумов увеличилось, а сами максимумы стали значительно резче (рис. 41 б). Это уже никак не входило в рамки их прежнего объяснения. Тут они вспомнили об объяснении Франка и Эльзассера на основе гипотезы де Бройля и стали проводить новые целенаправленные эксперименты с монокристаллом никеля. Схема одного из их экспериментов изображена на рис. 4.2, а один из результатов — на рис. 4.3.

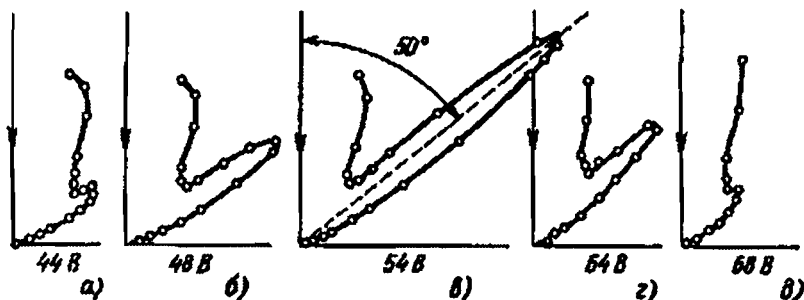


Рис. 4.3

Аккуратно проведенные эксперименты Дэвиссоном и Джермером в 1927 году полностью подтвердили гипотезу де Бройля о существовании волновых свойств у электронов (C. J. Davisson, L. H. Germer. Phys. Rev. 30, p. 705, 1927).

Вот как представил историю этого открытия Дэвиссон в своей Нобелевской лекции в 1937 году: «Из теории следует, что пучки электронов, подобно пучкам света, обладают волновыми свойствами. Рассеиваясь на подходящей решетке, они должны дать дифракционную картину. Об этой интересной возможности не было указано никем из ведущих теоретиков. Первым обратил на это внимание Эльзассер, который отметил в 1925 году, что наблюдение дифракции доказало бы физическое существование электронных волн. Этим завершаются предварительные этапы открытия дифракции электронов.

Мне приятно отметить, что опыты в Нью-Йорке, окончившиеся открытием дифракции электронов, были начаты еще до получения замечаний Эльзассера, вскоре после того, как оттиск работы де Бройля попал в Америку. Для истинной истории этого открытия характерен недостаток проницательности и избыток везения. Начало наших исследований нужно отнести к 1919 г., когда мы случайно обнаружили, что верхний предел энергетического спектра при вторичной электронной эмиссии совпадает с энергией первичных электронов, даже если они ускорены до сотен вольт. Это было объяснено упругим рассеянием электронов в металле.

С этого началось изучение углового распределения электронов, испытавших упругое рассеяние. И здесь опять вмешался случай: совершенно неожиданно мы обнаружили, что интенсивность упругого рассеяния зависит от ориентации рассеивающего кристалла. Так мы, совершенно естественно, пришли к изучению упругого рассеяния в заданном направлении. Начало этой фазы работы относится к 1925 г., т. е. она началась через год после появления работы де Бройля и всего за год до начала быстрого развития волновой механики. Таким образом, нью-йоркские опыты в своем начале не были проверкой волновой механики. Они приобрели такой характер лишь летом 1926 г. после того, как я обсудил их в Англии с Ричардсоном, Борном, Франком и другими.

Поиск дифрагировавшего пучка был начат осенью 1926 г., но найден он был не раньше начала следующего года. Сначала был обнаружен один пучок, затем, очень скоро, двадцать других. В девятнадцати случаях они были использованы для проверки связи между длиной волны и импульсом частицы. В каждом случае формула де Бройля $\lambda = h / p$ была подтверждена с точностью до погрешностей опыта.

Я кратко напомню схему опыта. Пучок электронов заданной скорости был направлен на грань (111) кристалла никеля (рис. 4.2). Коллектор позволял регистрировать лишь упруго рассеянные электроны или очень близкие к ним по энергии. Он мог поворачиваться по дуге вокруг кристалла. Сам



Томсон

кристалл можно было вращать вокруг направления первичного пучка. Таким образом можно было измерять интенсивность упругого рассеяния в любом направлении вперед от кристалла, за исключением направлений, лежащих в пределах углов от 10 до 15° .

В том же 1927 году английский физик Джордж Паджет Томсон (*D. P. Thomson*, 1892–1975), сын знаменитого Дж. Дж. Томсона, для обнаружения дифракции электронов применил метод, аналогичный методу Дебая—Шеррера, который широко используется в рентгеноструктурном анализе (*G. P. Thomson*. *Nature*, 119, p. 890, 1927; *Nature*, 120, p. 802, 1927; *Proc. Roy. Soc. London*, 117A, 1928; УФН, 99, с. 455, 1969).

Этот метод требует, чтобы рассеивающая мишень состояла из большого числа небольших случайно ориентированных микрокристаллов. Согласно теории дифрагировавшие волны должны распространяться по поверхности круговых конусов, оси которых совпадают с направлением первичного пучка (рис. 4.4).

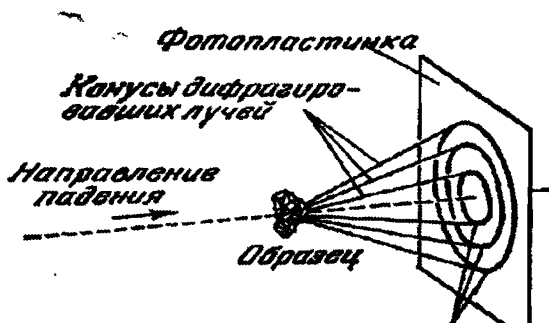


Рис. 4.4

Если на пути дифрагировавших лучей перпендикулярно направлению первичного пучка поместить фотопластинку, то на ней проявится характерная дифракционная картина в виде последовательности концентрических окружностей. Именно такую удивительную картину в виде концентрических окружностей получил Томсон с помощью пучка электронов, прошедших сквозь тонкую металлическую пленку и попавших затем на фотопластинку (рис. 4.5). Так было наглядно доказано, что электроны обладают волновыми свойствами. Анализируя результаты своих экспериментов, Томсон пришел к выводу: «Катодные лучи ведут себя как волны с длиной волны h/mv в соответствии с де-бройлевской теорией волновой механики».

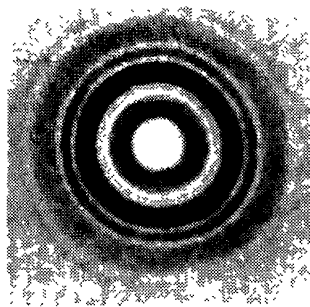


Рис. 4.5

За открытие дифракции электронов на кристаллах Дэвиссон и Томсон в 1937 году получили Нобелевскую премию.

Значительно позже Макс Борн писал: *«Замечателен исторический факт, что сыну человека, который установил корпускулярную природу катодных лучей, выпала судьба показать их волновую природу».*

Парадоксальность гипотезы де Бройля, подтвержденной опытами Дэвиссона и Томсона, красноречиво отмечал Шредингер в 1928 году: *«Некоторые исследователи (Дэвиссон и Джермер и молодой Дж. П. Томсон) приступили к выполнению опыта, за который еще несколько лет назад их бы поместили в психиатрическую больницу для наблюдения за их душевным состоянием. Но они добились полного успеха».*

Идеи де Бройля и блестящие эксперименты Дэвиссона и Джермера и Томсона внесли сумятицу в умы физиков. До этого никто не сомневался в корпускулярной природе электронов, т. е. в их сущности как частиц. Теперь оказалось, что они обнаруживают интерференционные явления, как если бы они были волнами с длиной волны, определяемой формулой де Бройля. По этому поводу Уильям Генри Брэгг шутил так: *следовало полагать, что по понедельникам, средам и пятницам электроны являются волнами, по вторникам, четвергам и субботам — частицами, а по воскресеньям они отдыхают.* Что называется, подливал масла в огонь и сам Дэвиссон, который в своей статье «Существуют ли электронные волны?» (*Franklin Inst. Journal*, 205, p. 597, 1928) писал: *«Это в высшей степени парадоксально и способно привести в замешательство. Мы должны поверить не только в то, что в определенном смысле кролики суть кошки, но также и в том, что в некоем смысле кошки суть кролики».* Эта проблема стала предметом острых дискуссий в физике, о чем будет говориться дальше.

Помимо классических экспериментов по дифракции электронов в дальнейшем были выполнены также опыты, являющиеся аналогами известных опытов по дифракции света. Была зарегистрирована дифракция электронов на прямолинейном крае полубесконечной плоскости, отмечено пуассоновское пятно (*G. Matteucci. Amer. J. Phys.* 58(12), p. 1143, 1990), наблюдалась

интерференция электронов по схеме, аналогичной экспериментам с бипризмой Френеля, с зонной пластинкой и т. д. (*G Möllenstedt, H. Düker, Zs.f.Phys. 145, p. 377, 1956*).

Интерференционные и дифракционные явления позднее были открыты не только для электронов, но и для других «частиц» — нейтронов, протонов, α -частиц и даже молекул. В настоящее время на основе опытов с интерференцией электронов и нейтронов развились новые мощные методы исследования кристаллов — электронография и нейтронография. Эти методы не только не уступают методу рентгенографического анализа, но и в ряде случаев оказываются более удобными и более точными. В частности, в настоящее время разработан эффективный метод получения голографических изображений расположения атомных ядер кристаллического вещества с помощью пучка нейтронов. На основе волновых свойств электрона успешно разрабатывается также новая техника для получения поверхностных изображений и т. п.

Волновыми свойствами согласно де Бройлю обладают все материальные тела. Однако для макроскопических тел длина волны де Бройля настолько мала, что говорить об их волновых свойствах не имеет смысла. Например, для Земли ($m_3 = 5 \cdot 10^{27} \text{ г}$) при ее обращении вокруг Солнца со скоростью $3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ длина волны де Бройля равна $4 \cdot 10^{-61} \text{ см}$.

Таким образом, многочисленные эксперименты подтвердили справедливость гипотезы Луи де Бройля о том, что корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством материи. Это означало, что классическая физика, противопоставляющая частицы и волны, не может описывать явления микромира. Назрела необходимость создания новой механики микромира, которую Макс Борн в 1924 году назвал *квантовой механикой*.

За открытие волновых свойств электрона Луи де Бройлю в 1929 году была присуждена Нобелевская премия.

4.3. «ФИЗИКА МАЛЬЧИШЕК»

Термин «*квантовая механика*» впервые появился в заголовке статьи Макса Борна в 1924 году. Почти тождественный термин «*механика квантов*» ввел Лоренц в своем докладе «Старая и новая механика» в конце 1923 года. Выступая в Сорбонне, он говорил: *«Все это очень красиво и крайне важно, но, к сожалению, не очень понятно. Мы не понимаем ни гипотезы Планка об осцилляторах, ни запрета нестационарных орбит, и мы не понимаем, как же, в конце концов, образуется свет согласно теории Бора. Не подлежит сомнению, что механику квантов, механику дискретного, еще предстоит создать»*.

Современная квантовая механика была создана за сравнительно короткое время в период с 1925 по 1927 год. Это был период коренной ломки



Гейзенберг

устоявшихся понятий и представлений. Для этого периода была характерна, по образному выражению Эйнштейна, «драма идей». Новые идеи возникали в результате научного озарения гениальных умов. Удивительно, что новые результаты были получены раньше, чем становился понятным их смысл. Первый прорыв на пути создания квантовой механики сделал немецкий физик Вернер Гейзенберг (*Werner Karl Heisenberg*, 1901–1976) летом 1925 года.

*Вернер Карл Гейзенберг был учеником Зоммерфельда в Мюнхенском университете, затем он учился в аспирантуре у Макса Борна в Геттингенском университете. Много лет он общался с Нильсом Бором. Его работы относятся к квантовой механике, квантовой электродинамике, теории ядра, магнетизму, теории элементарных частиц, единой теории поля, философии естествознания. В 1925 году он создал первый вариант квантовой механики в матричной форме, в 1927 г. открыл чрезвычайно важный в квантовой теории принцип неопределенности. В 1932 году ввел понятие изотопического спина, построил теорию ядерных сил, развил идею обменного взаимодействия Иваненко—Тамма. В 1943 году ввел матрицу рассеяния (*S*-матрицу), играющую важную роль в квантовой теории поля.*

Гейзенберг, вспоминая зиму 1924–1925 года, когда он был ассистентом Нильса Бора в Копенгагене, говорил: «Паули и я держались мнения, что переход к полной математической схеме квантовой механики совершится когда-нибудь путем удачной догадки». Свои догадки Гейзенберг изложил в первой статье «О новом квантово-механическом толковании кинематических и механических соотношений», которая поступила в редакцию журнала *Zeitschrift für Physik* 29 июля 1925 года (*Z. Phys.* 33, 879, 1925; перевод: УФН, 122, с. 574, 1977). Этот день может считаться днем рождения современной квантовой теории. За свою работу Гейзенберг получил Нобелевскую премию в 1932 году. В этой работе Гейзенберг представил первый вариант квантовой механики в так называемой матричной форме. обосно-

вывая свой подход, он писал: «Частотное условие Эйнштейна—Бора (справедливое во всех случаях) уже представляет собой столь полный отход от классической механики, или точнее ... от кинематики, лежащей в основе этой механики, что даже для решения простейших квантово-теоретических задач нельзя вовсе применять классическую механику. При таком положении представляется мыслимым оставить всякую надежду на возможность наблюдения величин, доселе бывших ненаблюдаемыми, как-то положение и период обращения электрона, и признать, что частичное согласие квантовых правил с опытом является более или менее случайным. Вместо этого представляется более разумным попытаться разработать квантово-теоретическую механику, аналогичную классической механике, но в которой встречаются соотношения только между наблюдаемыми величинами».

Таким образом, по словам Макса Борна, Гейзенберг «хотел обосновать новую механику как можно более непосредственно на опытных данных», опираясь на «тот фундаментальный принцип современной науки в целом, который отличает ее от схоластики и догматических систем философии».

Гейзенберг полагал, что в теории должны содержаться только наблюдаемые величины, такие как испускаемые и поглощаемые кванты, частота и амплитуда «чего-то» колеблющегося в атоме. Частота проявляется в цвете спектральных линий, амплитуда — в их яркости, интенсивности. Знание частот согласно комбинационному принципу дает возможность определить «энергетическую лестницу» в атоме. Если известны амплитуды, то можно по идее Эйнштейна вычислить вероятности квантовых переходов — скачков. Такой подход, по замыслу Гейзенберга, устраняет непоследовательность теории Бора — движение электрона по воображаемым орбитам. Для того чтобы найти соотношения между наблюдаемыми величинами, Гейзенберг придумал, как он считал, новый математический аппарат. В теории Гейзенберга каждая наблюдаемая физическая величина характеризуется двумя числами, которые определяют начальное и конечное состояния системы. Например, координате x соответствует совокупность матричных элементов x_{nm} , где числа n , t характеризуют начальное и конечное состояния.

Гейзенберг получил замкнутую систему уравнений для наблюдаемых величин и рассмотрел конкретную модельную задачу — гармонический осциллятор. Своим матричным методом он нашел энергетический спектр осциллятора, содержащий нулевую энергию $E_n = \hbar\omega(n + 1/2)$, и рассчитал вероятности переходов между различными уровнями энергии. Надо сказать, что за полгода до публикации статьи Гейзенберга существование нулевой энергии было надежно установлено в экспериментах американского физико — химика Роберта Малликена (*R. S. Mulliken*, 1896).

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkereffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekrenzten Felder“ (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absege an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

На основе своего анализа Гейзенберг впервые пришел также к потрясающему в то время заключению: в теории, согласованной с комбинационным принципом Ритца, не может быть классического понятия о траектории электрона внутри атома. Это было первым шагом на пути открытия принципа неопределенности.

Вольфганг Паули, ровесник и друг Гейзенберга, считал, что новые идеи в физике и вообще новая квантовая механика являются уделом «мальчишек» — «*Knabenphysik*», каким он в то время был сам, а также Гейзенберг, Йордан, Дирак. Поэтому он восторженно встретил идеи Гейзенберга, говоря в июле 1925 года, что это была «утренняя заря, начало рассвета квантовой теории». Одним из первых ознакомился со статьей Гейзенберга и Макс Борн (*Max Born*, 1882–1970), входивший в число тех, кто «делал» новую квантовую физику. По сравнению с «мальчишками» Борн был уже «стариком».

Макс Борн окончил Геттингенский университет в 1907 году, затем был профессором Берлинского, Франкфуртского и Геттингенского университетов. Работал в Кембридже и Эдинбургском университете (Шотландия). Он является одним из создателей матричной квантовой механики. В 1926 году он дал статистическую интерпретацию волновой функции, за что был удостоен Нобелевской премии в 1954 году. Он разработал метод решения квантово — механических задач о столкновении частиц на основе теории возмущений (это — борновское приближение). Совместно с Норбертом Винером (*N. Wiener*, 1894–1964) в 1926 году ввел в квантовую механику понятие оператора.

Макс Борн был, как он впоследствии вспоминал, «совершенно очарован» работой Гейзенберга. Вместе с тем он заметил: «Каким талантливым невеждой надо было быть, чтобы не знать существующего математического аппарата и самому изобрести его, раз он тебе понадобился». Дело в том, что математический аппарат, который «изобрел» Гейзенберг, в то время был уже хорошо разработан. Это была математическая теория матриц, которую, как оказалось, он совершенно не знал. Когда Борн рассказал Паули о матрицах, которые фактически использовал Гейзенберг, Паули саркастически заметил: «Да, я знаю, что вам нравится скучный и сложный формализм. Вы только испортите физические идеи Гейзенберга своей пустяковой математикой». Паули высоко ценил идеи Гейзенберга, не упуская вместе с тем случая подчеркнуть сложность применяемого математического аппарата: «Механика Гейзенберга вновь вселила в меня надежду и радость жизни. Она пока не принесла решение загадки, но я верю, что теперь можно снова двигаться вперед. Следует прежде всего искать путь освобо-



Борн

дить механику Гейзенберга от геттингенского потока формальной учености и лучше выявить ее физическую сущность».

Как отмечал в своей Нобелевской речи Макс Борн, «Гейзенберговское правило умножения не давало мне покоя, и через восемь дней интенсивных размышлений и проверок в моей памяти воскресла алгебраическая теория, которой учил меня профессор Розанес в Бреслау... Я никогда не забуду того глубокого волнения, которое я пережил, когда мне удалось сконцентрировать идеи Гейзенберга о квантовых условиях в виде таинственного уравнения $pq - qp = h / 2\pi i$ ». Это важное равенство получило название соотношения коммутации. К октябрю 1925 года Вернер Гейзенберг, Макс Борн и Паскуаль Йордан (*P. Jordan*, 1902–1980) завершили построение матричной механики, доведя ее с «геттингенской ученостью» до полного совершенства. Они ввели понятие канонических преобразований, т. е. таких преобразований, которые сохраняли перестановочные соотношения. Их статья была опубликована в январе 1926 года.

Идеи Гейзенберга развил и представил в другой математической, но эквивалентной форме английский физик Поль Дирак (*Paul Adrien Maurice Dirac*, 1902–1985).

Поль Адриен Дирак окончил в 1921 году Бристольский университет и получил специальность инженера-электрика. В годы депрессии после первой мировой войны Дирак не смог найти работу по специальности и решил продолжить свое образование в Кембридже.

Его научным руководителем был известный физик Ральф Фаулер (*R. Fowler*, 1889–1944). От него Дирак в сентябре 1925 года узнал о работе Гейзенберга. Дирак — один из создателей квантовой механики. В 1927 году он впервые проквантовал электромагнитное поле, заложив тем самым основы квантовой электродинамики. В 1928 году он создал квантовую релятивистскую теорию движения электрона. Предсказал существование позитрона. Он ввел множество символов и обозначений, которые широко используются в современной физике. За открытие новых форм атомной теории совместно с Шредингером он был удостоен Нобелевской премии в 1933 году.

Уже в ноябре 1925 года в журнале *Proceedings of Royal Society A* (109, p. 642; УФН, 122, с. 611, 1977) Дирак опубликовал знаменитую статью «Основные уравнения квантовой механики». Дирак исходил из гамильтоновой формы уравнений движения для любой динамической переменной u : $du / dt = \{u, H\}$, где H — функция Гамильтона, правая часть представляет скобки Пуассона. По поводу таких уравнений движения Дирак писал: «Гамильтон был, по-видимому, наделен каким-то удивительным даром проникать в самую суть... Он нашел для



Дирак

уравнений механики такую форму записи, значение которой суждено было понять лишь спустя столетие, через много лет после его смерти».

Впоследствии Дирак вспоминал: «В одно из октябрьских воскресений 1925 года, когда, несмотря на твердое желание отдохнуть на прогулке, я усиленно размышлял над разностью $uv - vu$, мне... вспомнилось, что в продвинутых курсах динамики я кое-что читал о таких странных величинах, как скобка Пуассона, и мне показалось, что существует тесная аналогия между скобкой Пуассона для величин u и v и коммутатором $uv - vu$... Я плохо помнил, что такое скобка Пуассона, и не знал для нее точной формулы... Но скобка Пуассона таила в себе замечательные возможности, и я подумал, что, может быть, мне удастся сделать великое открытие. Я чувствовал себя обязанным освежить свои знания о скобке Пуассона...

За городом это было невозможно, поэтому мне оставалось поспешить домой... Имевшиеся у меня учебники были слишком элементарны и не содержали таких сведений. Больше я просто ничего не мог сделать, потому что в воскресенье вечером библиотеки не работали. В мучительном ожидании я провел ночь ничего не зная о том, стояла ли чего-нибудь моя идея, но в течение этой ночи уверенность моя крепла. Наутро я бросился в библиотеку прямо к открытию и, найдя в „Аналитической динамике“ Уиттекера скобку Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно... Мысль о том, чтобы связать скобку Пуассона с коммутаторами, положила начало моей работе в области новой квантовой механики».

С помощью замены $\{u, H\} \Rightarrow (uH - Hu)/i\hbar$, Дирак ввел квантовые скобки Пуассона, и пришел к общему уравнению движения для операторов в квантовой механике. Далее, не используя явно матричное исчисление, он получил все основные результаты Гейзенберга, Борна и Йордана. В следующей работе (Proc. Roy. Soc. A, 110, p. 561, 1926) Дирак применил свою теорию для расчета атома водорода, и подтвердил известные результаты теории Бора. Этими работами было завершено построение матричной версии новой квантовой теории.

Сам Гейзенберг был удручен тем, что ему не удалось решить своим методом проблему атома водорода. Находясь в состоянии раздражения от постоянной критики Паули матричного метода, Гейзенберг как-то написал ему: «Твои постоянные оскорбления Копенгагена и Геттингена — ужасный позор. Ты вынужден будешь признать, что, во всяком случае, мы не собираемся разрушить физику из злых намерений. Когда ты бранишь нас, что мы такие ослы, что не придумали ничего физически нового, то это вполне может быть правдой. Но тогда ты такой же болван, потому что ты тоже не даешь нового». Эти слова, по-видимому, глубоко заделали Паули и он, несмотря на свою критику матричного формализма, почти одновременно с Дираком решил задачу об атоме водорода матричным мето-

дом (*Z. Phys.* 36, p. 336, 1926). По этому поводу Гейзенберг спустя много лет вспоминал: «Уже в октябре того же 1925 года Паули преподнес мне сюрприз — законченную матричную механику атома водорода. Мой ответ от 3 ноября начинался словами: „Едва ли нужно писать, как сильно я радуюсь новой теории водорода и насколько велико мое удивление, что ты смог так быстро ее разработать“».

Так постулаты Бора наконец-то получили квантово — механическое обоснование. Вместе с тем, матричная квантовая механика была довольно сложной и обходила стороной ждущую своего решения проблему корпускулярно — волнового дуализма. Впрочем, следует помнить, что к тому времени еще не было экспериментального подтверждения гипотезы де Бройля. Кроме того, исключение из теории всех ненаблюдаемых величин не является таким уж безобидным делом. Это впоследствии отмечал Гейзенберг: «Эйнштейн обратил мое внимание на то, что утверждать, будто следует говорить только о наблюдаемых величинах, даже опасно. Потому что каждая разумная теория, кроме непосредственно наблюдаемых, должна давать возможность наблюдать и нечто более опосредованное. Мах, например, был убежден, что понятие атома было принято только из-за его удобства, в целях экономии мышления, он не верил в реальность атомов. В наше время каждый сказал бы, что это нонсенс; совершенно ясно, что атомы существуют». Это же отмечал и Макс Борн, говоря о принципе, используемом Гейзенбергом: «...если под этим принципом разуметь (как это делают многие) исключение из теории всех ненаблюдаемых величин, то это ведет к бессмыслице. Например, волновая функция Шредингера ψ является такой ненаблюдаемой величиной, но, конечно, она позднее была принята Гейзенбергом как полезное понятие. Он установил не догматический, а эвристический принцип. Он обнаружил с помощью научной интуиции неадекватные понятия, которые должны быть исключены».

Матричная механика Гейзенберга отпугивала физиков того времени тем, что они или не знали, или редко использовали теорию матриц, или тем, что предпосылки теории казались довольно необычными и мало понятными. Среди них был молодой тогда Энрико Ферми (*E. Fermi*, 1901–1954). По воспоминаниям Сегре (*E. Segre*, 1905–), «Великая статья Гейзенберга по матричной механике 1925 г. не показалась Ферми особенно ясной, и он овладел квантовой механикой позже, лишь ознакомившись с волновой механикой Шредингера. Я хочу подчеркнуть, что эта позиция Ферми никоим образом не вызывалась математическими трудностями и новизной матричной алгебры — подобные трудности были для него не более чем мелкой помехой; скорее, ему были чужды физические идеи, лежащие в основе этих статей» (Э. Сегре. Энрико Ферми — физик. М.: Атомиздат, 1965).

Бор высоко оценил работу Гейзенберга, и вскоре после опубликования его статьи он говорил: *«Весь аппарат квантовой механики можно рассматривать как точную формулировку тенденций, заложенных в принципе соответствия»* (Н. Бор. Избр. научн. труды. М.: Наука, 1971. Т. 2, с. 7).

Хотя механика Гейзенберга отпугивала физиков, склонных к эксперименту, но вместе с тем, она будила мысли теоретиков. Бор в августе 1925 года, всего несколько недель спустя после выхода статьи Гейзенберга отметил ее как выдающееся достижение. Он прозорливо говорил: *«...этот глубокий подход к проблемам квантовой теории предъявляет большие требования к нашей способности абстрактного мышления... Будем надеяться, что началась новая эра взаимного стимулирования механики и математики»*. Как и предсказывал Бор, дальнейшее развитие квантовой теории стало возможным лишь при взаимном стимулировании физики и математики. Очень плодотворным оказалось сотрудничество Макса Борна и американского математика Норберта Винера (N. Wiener, 1894–1964). Они ввели линейные операторы в квантовую механику.

Как вспоминал Винер, *«Когда профессор Борн приехал в Соединенные Штаты, его крайне занимала новая основа, которую только что предложил Гейзенберг для квантовой теории атома... Борн стремился к теории, которая обобщила бы эти матрицы... Работа эта носила в высшей степени специальный характер, и он рассчитывал на мою помощь... У меня уже было готово обобщение матриц в форме так называемых операторов. У Борна была масса сомнений в основательности моего метода, и его мучил вопрос, одобрит ли Гильберт мою математику. В действительности Гильберт ее одобрил, и с тех пор операторы остаются неотъемлемой частью квантовой теории»*.

Борн и Винер дали определение оператора: *«оператор — это правило, согласно которому из функции $x(t)$ можно получить другую функцию $y(t)$... Если $q\{x(t) + y(t)\} = qx(t) + qy(t)$, то оператор линеен»*.

Решив задачи о квантовом осцилляторе и одномерном равномерном движении, они показали возможность использования новой операторной техники как для периодических, так и для непериодических явлений. Вместе с тем, введя операторы в квантовую механику, они упустили возможность открытия волновой механики раньше Шредингера. Об этом впоследствии с огорчением вспоминал Борн: *«Мы выразили энергию, как d/dt и записали закон коммутативности для энергии и времени как тождество, применив оператор $[t(d/dt) - (d/dt)t]$ к функции времени; он имел точно такой же вид, как для q и p . Но мы этого не увидели. И я никогда не прощу себе этого, потому что, если бы мы сделали это, мы бы сразу же за несколько месяцев до Шредингера, получили всю волновую механику из квантовой механики»*.

Говоря о матричной механике, Борн впоследствии отмечал: «...что, собственно, означал этот формализм, оставалось совершенно неясным. ... Пока мы обсуждали этот вопрос, произошло... драматическое событие: появились знаменательные статьи Шредингера. Его мышление развивалось по совершенно иному пути, восходившему к Луи де Бройлю».

4.4. ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА

Дальнейшее существенное развитие квантовой теории связано с именем Шредингера. Он был одним из солидных по возрасту создателей квантовой механики — ему в то время было около 40 лет, а другие были «мальчишками»: Паули — 25, Гейзенбергу — 24, Дираку и Иордану — по 23 года.

Эрвин Шредингер (Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, 1887–1961), родом из Вены, с 1921 по 1927 год работал профессором в Цюрихском университете на кафедре теоретической физики. Будучи физиком классической закалки, он надеялся вернуть квантовой механике «здоровый смысл» без квантовых скачков и других особенностей. После сформулированного им уравнения Шредингера он в 1927 году стал преемником Макса Планка на кафедре теоретической физики Берлинского университета.

Его основные работы относятся к квантовой теории, статистической физике и термодинамике, теории относительности, биофизике. Он написал целый ряд блестящих книг, статей, воспоминаний. Его книга «Что такое жизнь?» способствовала привлечению физиков к проблемам молекулярной биологии. Он был высококультурным человеком со складом ума поэта и мыслителя.

Осенью 1925 года Шредингер, будучи неудовлетворенным идеями и аппаратом матричной квантовой механики, раздумывал о построении новой, волновой механики. В четырех статьях с января по июнь 1926 года в журнале «*Annalen der Physik*» (Э. Шредингер. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976) он изложил свою теорию под общим названием «Квантование как проблема собственных значений». Он писал: «Моя теория была инспирирована работами Луи де Бройля и коротким, но бесконечно дальновидным замечанием Эйнштейна.

Я не представляю себе какой бы то ни было генетической связи с Гейзенбергом. Мне, конечно, было известно о его теории, но я чувствовал испуг, если не сказать, отвращение, от методов трансцендентной алгебры, которые казались мне очень трудными, и недостатка наглядности». Как только появилась теория Шредингера, Гейзенберг сильно расстроился и очень надеялся, что эта теория окажется неправильной. Когда в июне 1926 года Макс Борн использовал метод Шредингера в зада-



Шредингер

че об атомных столкновениях и дал статистическую интерпретацию волновой функции Шредингера, Гейзенберг осудил его за измену «само́му духу матричной механики» и переход «во вражеский лагерь». Гейзенберг писал в то время: «Чем больше я размышляю о физической стороне теории Шредингера, тем ужаснее она мне кажется».

Свою первую статью, посвященную вариационному выводу волнового уравнения и его применению к атому водорода, Шредингер начинает словами: «В этом сообщении я хотел бы на примере простейшего случая атома водорода (в нерелятивистском и невозмущенном случае) показать, что обычные правила квантования могут быть заменены другим условием, в котором нет упоминания о целых числах. Целые числа появляются столь же естественно, как числа узлов колеблющейся струны. Новое представление может быть обобщено и, как я думаю, глубоко связано с сущностью квантовых предписаний».

Шредингер исходил из уравнения механики в форме Гамильтона—Якоби $H(q, \partial S_0 / \partial q) = E$, где H — функция Гамильтона, S_0 — функция укороченного действия, q — обобщенные координаты, $p = \partial S_0 / \partial q$ — обобщенные импульсы, E — энергия стационарного состояния, и вводит ψ — функцию с помощью равенства $S_0 = K \lg \psi$, где K — постоянная с размерностью действия. Для электрона в атоме водорода из написанных соотношений в декартовых координатах следует уравнение

$$(\partial \psi / \partial x)^2 + (\partial \psi / \partial y)^2 + (\partial \psi / \partial z)^2 - (2m / K^2)(E + e^2 / r)\psi^2 = 0,$$

где e и m — заряд и масса электрона. Далее Шредингер использовал не это уравнение, а полагал нулю вариацию интеграла от этого выражения:

$$\delta J = \delta \iiint dx dy dz [(\partial \psi / \partial x)^2 + (\partial \psi / \partial y)^2 + (\partial \psi / \partial z)^2 - (2m / K^2)(E + e^2 / r)\psi^2] = 0.$$

При этом он приводит обоснование: «Мы ищем такие реальные во всем пространстве, однозначные, конечные и дважды непрерывно дифференцируемые функции ψ , которые делают интеграл по всему пространству экстремальным. Это вариационное требование заменяет квантовые условия». После варьирования непосредственно получается знаменитое уравнение Шредингера:

$$\Delta \psi + \frac{2m}{K^2} \left(E + \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0,$$

при условии

$$\int df \delta \psi \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0.$$

Интегрирование ведется по бесконечно удаленной замкнутой поверхности с нормалью n .

Так Шредингер пришел к волновому уравнению для стационарных состояний.

Второе соотношение имеет значение для исследования поведения несвязанных электронов на «гиперболических орбитах». Решение полученного уравнения Шредингер ищет в сферических координатах по методу разделения переменных, рассматривая случаи $E > 0$ (свободный электрон) и $E < 0$ (связанный электрон). Угловая часть волновой функции описывается шаровыми функциями. Решение уравнения для радиальной части волновой функции Шредингер проводит очень громоздким методом. Теперь достаточно простой способ решения излагается во всех курсах квантовой механики. Для связанных состояний он нашел дискретный спектр собственных значений энергии, который, естественно, при $K = \hbar$ совпал с уже известным результатом, полученным давно Бором и затем полученным Паули матричным методом, а также Дираком с помощью его некоммутативной алгебры.

«Едва ли нужно пояснять, — писал Шредингер, — насколько более привлекательным было бы представление о том, что при квантовом переходе энергия переходит из одной формы колебаний в другую, чем представление о перескакивающем электроне. Изменение формы колебаний может протекать непрерывно в пространстве и во времени; оно вполне может длиться столько времени, сколько занимает... процесс излучения».

О свойствах волновой функции Шредингер писал так: *«Представляется весьма естественным связать функцию ψ с некоторым колебательным процессом в атоме. Такой колебательный процесс кажется сегодня более реальным, чем орбиты, приписываемые электронам. Вначале я тоже намеревался обосновать квантовые условия в этой наглядной форме, но затем предпочел более нейтральную математическую формулировку, которая сегодня более ясно описывает существенное».*

Это существенное представляется мне в том, что квантовые условия с их таинственными „требованиями целочисленности“ заменяются более общим требованием — конечности и однозначности некоторой пространственной функции».

Физический смысл этого требования стал вполне понятным, когда был раскрыт физический смысл самой волновой функции.

Шредингер исходил, как он сам отмечал, из идей де Бройля: *«В первую очередь я хотел бы отметить, что толчком к изложенным выше соображениям послужили остроумные идеи господина Луи де Бройля и, в частности, обдумывание по поводу пространственного распределения его „фазовых волн“, в отношении которых он показал, что они всегда укладываются целое число раз вдоль траектории при периодическом движении электрона. Главное отличие заключается в том, что де Бройль опе-*

рирует с бегущими волнами, в то время как мы — со стоячими». Фактически же Шредингер рассмотрел не свободный электрон, как де Бройль, а электрон, находящийся во внешнем поле, например, в поле ядра в атоме водорода.

Австрийский физик и химик, один из основоположников теории твердого тела, Петер Дебай (*P. Debye*, 1884–1966) рассказывал о том, как начиналась работа Шредингера, приведшая к открытию волновой механики: *«Тогда де Бройль опубликовал свою статью. В то время Шредингер сменил меня в Цюрихском университете, а я преподавал в Высшей Технической школе, и мы вели совместный colloquium. Мы поговорили о теории де Бройля, решили, что мы ее не понимаем и что должны как следует подумать над формализмом де Бройля и его смыслом. Так я предложил Шредингеру выступить на colloquium. Подготовка и толкнула его начать работу. Между его выступлением и появлением его статей прошло всего несколько месяцев».*

А вот как рассказывал об этом же Петр Леонидович Капица (1894–1984): *«Очень поучительна история, как Шредингер создал свои уравнения. Шредингер тогда работал у Дебая, который и рассказал мне подробности, как Шредингер пришел к своим уравнениям. Прочтя работу де Бройля в „Comptes rendus“, Дебай предложил Шредингеру рассказать о ней на семинаре. Шредингер на это ответил примерно так: „О такой чепухе я не хочу рассказывать“. Но Дебай, как старший руководитель, сказал, что все же ему надо это сделать. Тогда Шредингеру пришлось согласиться, и он решил попытаться представить на семинаре идеи де Бройля в более удобопонимаемом математическом виде. Когда ему удалось это сделать, то он пришел к тем уравнениям, которыми прославился на весь мир и которые носят теперь его имя.*

Дебай мне рассказал, что, когда Шредингер излагал свою работу на семинаре, он сам не понимал, какое крупное открытие сделал. Дебай тут же на семинаре сказал ему: „Вы сделали замечательную работу“. Сам же Шредингер думал, что он только нашел хороший способ рассказать группе физиков о том, что сделал де Бройль. И это произошло через два года после того, как появилась работа де Бройля» (П. Л. Капица. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1981).

Волновые свойства электрона в каждой точке пространства с координатами x , y , z Шредингер описывает с помощью «волновой функции» $\psi(x, y, z)$. Поскольку электрон находится где-то внутри атома, то волновая функция, описывающая состояние электрона, должна исчезать на бесконечно большом удалении от ядра. Такое свойство волновой функции называют «естественным граничным условием». Именно это условие приводит к дискретным значениям энергии электрона в атоме: оказывается, что решение уравнения Шредингера для ψ -функции, обращаемой в нуль на беско-

нечно большом удалении, существует не всегда, а лишь тогда, когда энергия имеет вполне определенные дискретные значения. В случае атома водорода энергетический спектр по Шредингеру в точности совпадает с результатом Бора. Так Шредингер показал, что его волновая механика совершенно естественно приводит к правильным результатам с помощью последовательного решения задачи на собственные значения без каких-либо постулатов о квантовании.

Во второй статье 1926 года Шредингер обсуждает гамильтонову аналогию между классической механикой и геометрической оптикой, в которой используется только понятие о фазовой поверхности, и игнорируются важные понятия волновой оптики, такие как длина волны, ее частота и амплитуда. И Шредингер пишет: *«Однако уже первая попытка формирования волновой картины ведет к таким замечательным результатам, что невольно возникает другая мысль: сегодня уже нам известно, что наша классическая механика при очень малых размерах траектории и сильных ее искривлениях неверна. Может быть, это обстоятельство — полная аналогия с неприменимостью геометрической оптики, т. е. оптики с бесконечно малой длиной волны, которая наступает тогда, когда „экраны“ и „отверстия“ недостаточно велики по сравнению с действительной длиной волны. Может быть, наша классическая механика — полная аналогия геометрической оптики и как таковая неверна, т. е. не соответствует реальности, когда радиус кривизны и размер траектории невелики по сравнению с определенной длиной волны, которая реально существует в q -пространстве. Тогда возникает необходимость в развитии некоторой „волновой механики“».*

Эту проблему он рассматривает в следующем разделе и снова приходит к уравнению для волновой функции, которое он вначале получил вариационным методом. В этой же статье Шредингер применил свое уравнение к некоторым простым системам: линейному гармоническому осциллятору и ротатору (двухатомной молекуле).

В следующей статье Шредингер показал, что его волновая механика и матричная механика Гейзенберга приводят к одним и тем же результатам. Он доказал *«формальную, математическую тождественность»* волновой механики и матричной механики. В дальнейшем это было доказано строго в ряде работ других авторов.

С удивительной проницательностью Шредингер сопоставил обобщенному импульсу p_k оператор $\hat{p}_k = (\hbar/2\pi i)\partial/\partial q_k$ и рассмотрел коммутатор этих величин. Введя оператор Гамильтона, Шредингер и свое волновое уравнение записал в операторной форме. Затем он преобразовал операторные соотношения в матричные. В этой работе Шредингер заложил основы *теории представлений* в квантовой механике. Сравнивая волновую и матричную механику, он доказал, что матричная и волновая механики оказались разными по форме, но эквивалентными по существу. Это фактически яв-

ляется отражением корпускулярно-волнового дуализма микромира. Шредингер развил также теорию возмущений и применил ее к эффекту Штарка для атома водорода.

В последней своей статье этой серии Шредингер обосновал волновое уравнение для нестационарных состояний и, развив теорию возмущений на этот случай, он рассмотрел теорию дисперсии. Его попытка обобщения волнового уравнения с учетом релятивизма и магнитного поля оказалась unsuccessful.

Шредингер придавал большое значение тому, что групповая скорость волны де Бройля совпадает со скоростью частицы. Поэтому он считал, что *«приведенные обстоятельства позволяют значительно теснее, чем это можно было до сих пор, связать изображение движения точки с распространением волн. Можно попытаться построить волновую группу, имеющую во всех направлениях относительно малые размеры. Подобная волновая группа будет, по-видимому, двигаться по тем же законам, что и отдельная изображающая механическую систему точка. При этом получается, так сказать, суррогат изображающей точки до тех пор, пока протяженность нашей волновой группы пренебрежимо мала по сравнению с траекторией системы и ее можно считать точечной. Это будет, во всяком случае, иметь место лишь тогда, когда размеры и в особенности радиус кривизны траектории очень велики по сравнению с длиной волны... Я теперь с большой уверенностью утверждаю следующее: действительное механическое явление следует понимать или изображать как волновой процесс в q -пространстве, а не как движение изображающей точки в этом пространстве. Рассмотрение движения изображающей точки, составляющее предмет классической механики, является лишь приближенным способом изучения поведения системы и может быть оправдано лишь подобно тому, как в некоторых случаях оправдывается применение лучевой или геометрической оптики для изучения действительных волновых оптических процессов».*

С созданием волновой квантовой механики возникла проблема истолкования смысла волновой функции ψ . Сам Шредингер интерпретировал $\psi\psi^*$ как весовую функцию в конфигурационном пространстве, которая определяет электродинамические флуктуации пространственной плотности электрических зарядов. Он писал: *« ψ -функция должна быть, не более и не менее, как средством, что она и позволяет, математически охватить и представить всю совокупность таких флуктуаций с помощью единственного дифференциального уравнения в частных производных. Подчеркнем здесь еще раз, что не нужно и не следует искать для самой ψ -функции в общем случае прямой интерпретации в трехмерном пространстве, к чему весьма побуждает одноэлектронная задача, поскольку имен-*

но в общем случае она является функцией в конфигурационном, а не в обычном пространстве».

Гейзенберг считал, что физически реальны лишь частицы, а их волновой характер — математическая маска, при этом в атомном мире должны существовать скачки физических величин. Шредингер же считал, что физически реальны лишь волны, а их корпускулярность — это математическая иллюзия. При этом он не признавал скачков — «природа не делает скачков». Шредингер считал, что, наконец-то он избежал квантовых скачков и вернул в физику непрерывность, поскольку в его теории рассматривались непрерывные волновые функции. Для разрешения возникшего противоречия необходимо было вмешательство «третейского судьи». Такую выдающуюся роль «мозгового центра» новой квантовой теории выпало сыграть Нильсу Бору.

Осенью 1926 года по приглашению Бора Шредингер приехал в Копенгаген. В это время Гейзенберг снова работал в институте Бора, и они вместе встретили Шредингера на вокзале. Сразу же начались их острые дискуссии, которые продолжались и во время болезни Шредингера, возможно из-за простуды и нервного перенапряжения. Шредингер никак не соглашался с доводами Бора о скачках, который, по воспоминаниям Гейзенберга, убеждал его: *«То, что Вы говорите, абсолютно правильно. Но это не доказывает, что квантовых скачков нет. Это доказывает только, что мы не можем их вообразить, что предметно-изобразительные представления, с помощью которых мы описываем события повседневной жизни и эксперименты классической физики, становятся непригодными, когда мы приходим к описанию квантовой прерывности. И нам не следовало бы удивляться этому, раз уж мы сознаем, что замешанные тут процессы не входят непосредственно в опыт нашего бытия...»*. Шредингер все же возражал, и однажды, когда все его аргументы были исчерпаны, он в отчаянии воскликнул: *«Если эти проклятые скачки сохранятся в физике, я простить себе не смогу, что вообще связался с квантовой теорией!»*. На это Бор спокойно ответил: *«Но зато все мы чрезвычайно благодарны Вам... Ваша волновая механика принесла с собой такую математическую ясность и простоту, что явилась гигантским шагом вперед...»*. Гейзенберг также оставался на своих позициях, только Бор, по воспоминаниям Гейзенберга, *«...пытался во всем учитывать одновременное существование и корпускулярной и волновой картин. Он держался убеждения, что лишь обе эти картины совместно могут обеспечить полное описание атомных процессов... Я испытывал неприязнь к такому взгляду на вещи»*.

На семинарах у Бора нередко разгорались ожесточенные споры по поводу новых теорий. В пылу дискуссий спорящие физики, бывало, доказывали друг другу, что их рассуждения не имеют ничего общего с настоящей физикой. Эренфест, отличавшийся большим юмором, выдрессировал большого попугая, чтобы он отчетливо произносил популярную на семинаре

фразу: *«Aber das ist keine Physik, meine Herren!»* (*«Но это же не физика, господа!»*). Этому попугая Эренфест в шутку рекомендовал Бору в председатели семинара.

За открытие новых форм атомной теории Шредингеру вместе с Дираком в 1933 году была присуждена Нобелевская премия. Оценивая вклад Шредингера в развитие физики, Планк писал: *«Уравнение Шредингера в современной физике занимает такое же место, какое в классической механике занимают уравнения, найденные Ньютоном, Лагранжем и Гамильтоном».*

4.5. ВОЛНЫ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Шредингер считал, что электрон есть не что иное, как волна, вернее, совокупность различных волн, длины волн которых изменяются непрерывно в небольшом интервале вблизи некоторой «средней» длины волны. Такое волновое образование называют волновым пакетом. Особенность волнового пакета в том, что он имеет ограниченные размеры в пространстве. Говорят, что волновой пакет локализован в пространстве. А локализация в пространстве — это характерная особенность частиц. Таким образом, область локализации волнового пакета можно отождествить с размерами частицы. Кроме того, групповая скорость волны де Бройля для частицы совпадает со скоростью ее движения. Казалось, что таких аргументов вполне достаточно, чтобы считать электрон (и другие микрочастицы) волновым пакетом. По Шредингеру, *«движущаяся частица не что иное, как пена на волновой радиации, образующей мир».*

Однако имеются серьезные возражения против таких аргументов: прежде всего, оказалось, что волновой пакет перемещается как целое, без изменения своей первоначальной формы, лишь при отсутствии дисперсии. Дисперсия волн означает, что их фазовая скорость зависит от длины волны. Если учесть дисперсию, то окажется, что волновой пакет не сохраняет своей формы. Он расплывается со временем: амплитуда его непрерывно уменьшается, а ширина — увеличивается. Физически это связано с тем, что при наличии дисперсии плоские волны, образующие волновой пакет, распространяются с разными скоростями. Поэтому более быстрые составляющие волны убегают вперед, а более медленные — отстают. В итоге происходит искажение волнового пакета и его расплывание за время $\tau \approx m(\Delta x)^2 / h$, где Δx область локализации волнового пакета (размер частицы). В случае макроскопической частицы (например, с массой $m = 1\text{ г}$, размером $\Delta x = 0,1\text{ см}$) время расплывания пакета $\tau \approx 10^{18}$ лет. Это фантастически большое время, поэтому можно (но не нужно) рассматривать макроскопическую частицу как движущийся волновой пакет. В случае электрона ($m \approx 10^{-27}\text{ г}$, $\Delta x \approx 3 \cdot 10^{-13}\text{ см}$)

время расплывания волнового пакета $\tau \approx 10^{-26}$ с. Отсюда следует, что если бы электрон был волновым пакетом, то он практически мгновенно бы расплылся. Это противоречит многочисленным фактам устойчивого существования электрона (и других микрочастиц). Кроме того, волны обладают тем свойством, что при падении на границу раздела двух сред волна частично отражается, а частично преломляется. В отношении же электрона (и других микрочастиц) нет ни одного эксперимента, в котором бы проявлялась часть электрона, например, какая-то дробная величина его заряда. Во всех опытах всегда электрон выступает как целое со своим зарядом, массой, спином. Так же, как целое, выступает фотон, например, в фотоэффекте, эффекте Комптона и др. Другими словами, в отличие от волн электрон, фотон и другие элементарные частицы обладают свойством *неделимости*.

Таким образом, приведенные возражения вынуждают отказаться от представления о том, что электрон (и другие микрочастицы) является волновым пакетом, составленным из плоских волн де Бройля.

Неправильным оказалось также другое предположение, что волновыми свойствами обладает только ансамбль частиц, т. е. система большого числа электронов. Прямые опыты российских физиков Л. Бибермана, Н. Сушкина и В. Фабриканта в 1949 году (ДАН СССР, 66, с. 185) показали, что волновые свойства присущи отдельному электрону. В этих опытах средний промежуток времени, разделяющий прохождение отдельных электронов через дифракционную систему, был примерно в 30 тысяч раз больше времени движения электрона внутри всего прибора. Ясно, что в таких условиях картина попадания отдельных электронов на регистрирующую фотопластинку никак не зависит от взаимодействия между ними. При достаточно длительной экспозиции возникает дифракционная картина, которая оказывается такой же, как в опытах по дифракции интенсивных электронных пучков. Аналогичные опыты провел венгерский физик Лайош Яноши (*L. Janossi*, 1912–1978) в 1957 году с фотонами. Он показал, что отдельный фотон также обладает волновыми свойствами. Эти опыты, собственно, можно считать проявлением известного в оптике факта, что характер дифракционной картины не зависит от интенсивности падающего излучения.

Для понимания квантовых закономерностей чрезвычайно полезными оказались так называемые *мысленные эксперименты* («*Gedanken Experiments*»). Вот один из них, предложенный Эйнштейном. Пусть электроны падают на непрозрачный экран с двумя узкими параллельными щелями. Если расстояние между щелями порядка длины волны де Бройля, то за экраном на фотопластинке возникает дифракционная картина. Она состоит из ряда параллельных щели светлых и темных полос. Такая картина образуется и при последовательном прохождении сквозь щели отдельных электронов. Как частица, электрон может проходить только сквозь одну из щелей. Но на фотопластинке образуется дифракционная картина, характерная именно для двух щелей. Тогда возникает вопрос: откуда электрон «знает» о существо-

вании второй щели? Ответ был дан Нильсом Бором: при взаимодействии с экраном электрон ведет себя как волна. Поэтому он «проходит» одновременно через обе щели, так что невозможно указать, через какую именно щель прошел электрон. Когда же электрон сталкивается с фотопластинкой, то он ведет себя как частица, что обнаруживается по почернению зерна пластинки. В этом и проявляется корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц.

Характер дифракционной картины определяется дифракционной системой. Например, дифракция на двух щелях отличается от дифракции на одной щели. Однако в любом случае дифракционная картина состоит из ряда темных и светлых полос. Это значит, что на фотопластинке имеются места, куда электроны в основном попадают, и есть места, в которые электроны не могут попасть никогда. Возьмем произвольную точку на фотопластинке и зададим вопрос — попадет ли в эту точку отдельный электрон после прохождения дифракционной системы? Определенного ответа дать нельзя, так как мы знаем, что на фотопластинке со временем должна возникнуть дифракционная картина. Мы можем лишь утверждать, что электрон *либо* попадет, *либо* не попадет в выбранную точку. Это значит, что мы можем говорить лишь о *вероятности* того, что дифрагировавший электрон попадет в данную точку на фотопластинке. На этом основании говорят, что волна де Бройля является *волной вероятности*. Она определяет вероятность того, что электрон находится в некоторой области пространства вблизи рассматриваемой точки. Вероятное местоположение электрона и описывается волновой, или ψ -функцией. Ее называют также *амплитудой вероятности*. Идею о вероятностном толковании волновой функции выдвинул Макс Борн в 1926 году в статье «Квантовая механика процессов соударения» (Z. Phys. 38, p. 803, 1926; перевод: УФН, 122, с. 632, 1977). Эта идея позволяет сочетать волновые свойства электронов с их свойством неделимости. Например, в опытах Бибермана, Сушкина и Фабриканта вероятностный характер попадания электронов на фотопластинку проявляется в том, что вначале фотопластинка напоминает мишень с хаотически распределенными следами. Затем возникает упорядоченная дифракционная картина. И чем больше электронов попадает на фотопластинку (чем больше экспозиция), тем более четкой является эта картина.

Борн исходил из идеи Эйнштейна о том, что волновое поле является некоторым «призрачным полем» для квантов света — фотонов, и предложил считать волны де Бройля, описываемые уравнением Шредингера, некоторым «призрачным», или «ведущим полем» для микрочастиц. Согласно такой точке зрения, физический смысл имеет не сама волновая функция Шредингера, а квадрат ее модуля $|\psi(\vec{r}, t)|^2$: величина $|\psi(x, y, z, t)|^2 \Delta V$ представляет собой вероятность того, что частица (электрон) в момент времени t находится в элементе объема пространства ΔV вблизи точки с координатами x, y, z . Поясняя свою мысль, он писал: «Ведущее поле, пред-

ставленное посредством некоторой скалярной функции ψ от координат всех частиц и времени, распространяется согласно дифференциальному уравнению Шредингера. Однако импульс и энергия переносятся так, как будто бы на самом деле двигались микрочастицы. Траектории этих микрочастиц определены только в той мере, в какой они ограничены законами сохранения энергии и импульса; в остальном их выбор определяется только вероятностью, обусловленной значениями функции ψ . Это, может быть, можно выразить несколько парадоксально так: движение микрочастиц следует законам вероятности, сама же вероятность распространяется в согласии с законом причинности». Завершая свою статью, Борн писал: «На основании изложенных выше соображений, я хотел бы отметить, что квантовая механика позволяет сформулировать и решать не только системы в стационарном состоянии, но и процессы перехода. Шредингеровская форма квантовой механики представляется для этого наиболее подходящей; она позволяет сохранить обычные представления о пространстве и времени, в которых события развиваются нормально. В это же время из развитой выше теории не следует казуальной последовательности отдельных микропроцессов. В моем предварительном сообщении я особенно подчеркнул этот индетерминизм, так как он мне кажется соответствующим практике экспериментаторов».

Борн впоследствии вспоминал: «Решение этого вопроса не было свободным изобретением разума, а было вынуждено экспериментальными фактами. Статистическая интерпретация дебройлевских волн была внушена мне моим знанием экспериментов по атомным столкновениям... Все развитие квантовой механики показывает, что совокупность наблюдений и измерений медленно создает абстрактные формулы для их сжатого описания и что понимание их значения приходит впоследствии».

Нильс Бор, давно уже проникшийся убеждением, что микромир находится во власти вероятностных закономерностей, высоко оценил идею Борна, хотя и воспринял ее как само собой разумеющееся. Эйнштейн признавал эвристическую ценность статистического истолкования волновой функции, но считал, что более совершенная теория атомных процессов приведет к причинному их описанию.

Вернемся к опыту по дифракции электронов на двух щелях. Состояние электрона, пролетевшего через верхнюю щель (при закрытой нижней щели), описывается волновой функцией $\psi_1(\vec{r}, t)$, а состояние электрона, пролетевшего через нижнюю щель (при закрытой верхней), описывается функцией $\psi_2(\vec{r}, t)$. Если открыты обе щели, то состояние электрона описывается волновой функцией $\psi = \psi_1 + \psi_2$. Это отражает принцип суперпозиции состояний. Вероятность того, что электрон, прошедший через верхнюю щель (при закрытой нижней), попадает в некоторую точку на эк-

ране (или фотопластинке) за щелями (событие 1), определяется величиной $|\psi_1|^2$. Аналогично, вероятность попадания в ту же точку электрона, прошедшего через нижнюю щель при закрытой верхней щели (событие 2), определяется величиной $|\psi_2|^2$. Вероятность попадания электрона в эту точку на экране при обеих открытых щелях (событие 1 + 2) определяется как

$$|\psi|^2 = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + \psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2.$$

Отсюда видно, что вероятность события 1 + 2 не равна сумме вероятностей событий 1 и 2, т. е. при попадании на фотопластинку складываются не интенсивности волн де Бройля, а их амплитуды — волновые функции. Это и приводит к картине интерференции: в некоторых местах волны усиливают друг друга, а в других — гасят друг друга.

Волновая функция не описывает структуру электрона, т. е. она не дает ответа на вопрос — «как устроен электрон», а описывает возможные состояния его движения. Совершенно аналогично и в классической механике рассматривается движение материальной точки, которой может быть, например, планета, обращающаяся вокруг Солнца. Структуру «материальных точек» изучают в других соответствующих разделах физики.

Итак, наличие у микрочастиц волновых свойств приводит к необходимости описания их состояний с помощью волновой функции, имеющей вероятностный смысл. Вероятностный характер приобретают также предсказания квантовой теории. При этом в отличие от кинетической теории газов, где вероятностное описание обусловлено огромным количеством частиц, для которых начальные значения их динамических переменных (координат и импульсов) не известны, в квантовой теории вероятностное описание объективно связано с тем, что отдельной микрочастице присущи волновые свойства.

За вероятностную интерпретацию волновой функции Макс Бору в 1954 году была присуждена Нобелевская премия.

Надо сказать, что не все физики разделяли в то время такое понимание квантовой механики. В их число входили выдающиеся физики, основоположники квантовой теории — де Бройль, Эйнштейн, Шредингер. Они предприняли немало усилий, чтобы дать другую, чисто волновую интерпретацию квантовой механики. В частности, де Бройль предложил альтернативную интерпретацию, в которой сочетался вероятностный подход Борна и идеи Эйнштейна о том, что кванты света представляют собой сингулярности волнового поля. Де Бройль считал, что эти сингулярности «представляют собой кванты радиационной энергии». К 1927 году идеи де Бройля оформились в виде «теории двойного решения». Согласно этой теории линейные уравнения волновой механики допускают решения двух типов: непрерывную волновую функцию с ее вероятностным смыслом и

«сингулярное решение», особые точки которого представляют рассматриваемые физические частицы. Однако все попытки такого рода оказались безуспешными. Отчаявшись в своих поисках, Луи де Бройль в начале 30-х годов вынужден был признать:

«Вероятностная интерпретация — единственная возможность на сегодняшний день. Это означает, что сегодня она одна позволяет объяснить в рамках волновой механики все квантовые явления, которые наблюдаются экспериментально. Ни одна из попыток, сделанных в других направлениях, не привела к успеху. Автору данной книги это известно лучше, чем кому-либо другому, ибо он сам предпринимал попытки такого рода, которые ему в конце концов пришлось оставить из-за возникших непреодолимых трудностей». И все же еще долгое время продолжались безуспешные попытки избежать вероятностей в квантовой механике.

После интерпретации Борна волновой функции стали утверждать, что законы природы определяют не появление события, а вероятность его появления. Как позднее говорил Гейзенберг, для него подобные вероятностные волны служили *«количественным выражением понятия δύναμις, возможности, или в более поздней латинской форме, понятия potentia в философии Аристотеля... В современной квантовой теории такое представление приобретает новую форму; оно выражается количественно как вероятность и подчиняется законам природы, которые можно сформулировать математически»* (УФН, 66, с. 163, 1958).

4.6. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ

После изнурительных и, в общем, безрезультатных дискуссий со Шредингером и Гейзенбергом Нильс Бор в начале 1927 года решил немного отдохнуть на лыжах в тишине норвежского курорта Даларны. Гейзенберг в это время пребывал в Копенгагене и, оставшись один, настойчиво искал тот фундаментальный закон, который, по мысли Бора, должен существовать в механике микромира. Когда они встретились, то оказалось, что в результате своих мучительных исканий Гейзенберг открыл *соотношения неопределенностей*, а Бор привез с собою глубоко продуманный им *принцип дополнительности*. Вспоминая то время, Гейзенберг писал: *«Дискуссии о смысле квантовой теории лишь ненадолго были прерваны рождественскими каникулами. Вероятно, тот факт, что в середине февраля 1927 года Бор уехал на отдых в Норвегию, показал всем нам, насколько велика усталость, вызванная длительными дискуссиями. Конечно, Бор хотел использовать время не только для хождения на лыжах, но и для спокойного и неторопливого обдумывания основ квантовой теории. Мне в это время тоже было легче собраться с мыслями, и 23 февраля я написал Паули письмо на 14 страницах; содержание его в основном совпадало с содержанием последующей*

работы о соотношении неопределенности. Ответ Паули оказался намного оптимистичнее, чем я мог ожидать. „Да будет в квантовой теории день“, — приблизительно так звучал его ответ, побудивший меня изложить все содержание моих размышлений в подробной работе». Статья Гейзенберга под названием «О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики» была опубликована в майском номере журнала *Zeitschrift für Physik* (43, S. 172) за 1927 год (перевод: УФН, 122, с. 651, 1977). В этой статье по сути содержалось обоснование глубинных причин вероятностных закономерностей, присущих микромиру. Гейзенберг представлял себе мысленный эксперимент: насколько точно, например, с помощью сверхчувствительного микроскопа можно измерить положение электрона — его координату вдоль какого-нибудь направления. Если одновременно ухитриться измерить еще и его скорость, то тогда можно было бы точку за точкой установить траекторию движения электрона. Чтобы определить положение электрона, например, вдоль оси x , надо осветить его светом и посмотреть в микроскоп. Ясно, что погрешность такого измерения Δx не может быть меньше длины волны используемого света: $\Delta x \approx \lambda$, так что, чем меньше длина волны λ , тем с большей точностью можно измерить координату электрона. Но при взаимодействии с электроном свет передает ему импульс. Можно уменьшить величину передаваемого импульса, если сильно ослабить интенсивность света так, чтобы с электроном взаимодействовал только один фотон. В этом случае минимальный импульс, передаваемый электрону, будет определяться величиной импульса одного фотона $p = h / \lambda$. Таким образом, импульс электрона при измерении его положения можно определить лишь с погрешностью $\Delta p > h / \lambda$, т. е. чем меньше длина волны, тем большей оказывается погрешность в определении импульса электрона. Выходит, что «чем точнее определяется местоположение электрона, тем менее точными становятся сведения об импульсе». Другими словами, оказывается, что в микромире принципиально невозможно одновременно точно измерить и координату, и импульс частицы. Как видно из написанных соотношений, погрешности (неопределенности) в измерении координаты и соответствующего импульса задаются постоянной Планка: $\Delta x \Delta p > h$. Это и есть знаменитое соотношение неопределенностей Гейзенберга.

При более точном определении погрешностей измерений как среднеквадратичные дисперсии соотношение неопределенностей выражается

$$\text{формулой } \sqrt{(x - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{(p_x - \bar{p}_x)^2} \geq \hbar / 2 .$$

Таким образом, оказалось, что природа накладывает принципиальные ограничения на применимость понятий координаты и импульса микрочастицы. Такого ограничения в классической физике не было и не могло быть!

Надо сказать, что еще до открытия принципа неопределенностей Дирак и Йордан понимали, что в квантовой механике, в отличие от классической физики, задание точного значения координаты несовместимо с заданием точного значения импульса. Так Дирак писал в конце декабря 1926 года: *«В квантовой теории нельзя ответить ни на один вопрос относительно числовых значений и q и p одновременно. Однако, по-видимому, можно надеяться, что мы в состоянии дать ответ в тех случаях, когда числовые значения имеют смысл только для q или только для p , а выражаясь более общим образом — когда определенные числовые значения имеют любой набор постоянных интегрирования ξ , коммутирующих друг с другом»*. Аналогично высказывался в то же время Йордан: *«При данном значении q все значения p равновозможны»*.

Понять значение соотношений Гейзенберга можно с помощью простых оценок. Рассмотрим небольшую, но макроскопическую частицу, например, с массой 1 г . Погрешность в определении центра тяжести частицы примем за $\Delta x \approx 10^{-4} \text{ см}$. Тогда погрешность в определении скорости равна $\Delta v_x \approx h/m\Delta x \approx 10^{-23} \text{ см/с}$. Эта погрешность ничтожно мала. Она лежит далеко за пределами экспериментальных возможностей. Таким образом, для макроскопической частицы ее положение и импульс могут быть одновременно определены с достаточно высокой степенью точности. Поэтому для таких частиц вполне справедлив классический метод динамического описания с помощью координаты и импульса. В этом случае соотношение неопределенностей не имеет практического значения. Для микроскопической частицы, например, электрона, находящегося в атоме, $m_e \approx 10^{-27} \text{ г}$, $\Delta x \approx 10^{-9} \text{ см}$. Тогда погрешность в определении скорости равна $\Delta v_x \approx 10^9 \text{ см/с}$. Такая погрешность уже сравнима с самим значением скорости электрона и даже превосходит его. Действительно, характерной энергии электрона в атоме порядка 10 эВ соответствует скорость порядка $v \approx 10^8 \text{ см/с}$. Таким образом, при достаточно точном задании положения электрона в атоме его скорость нельзя считать вполне определенной.

Соотношения неопределенностей позволяют естественно объяснить факт существования атомов и их определенного объема, а также устойчивость атома при воздействии внешнего давления. Действительно, электроны в атоме испытывают электростатическое притяжение ядром. Несмотря на это электроны не «падают» на ядро, а остаются в ограниченном объеме атома. Это можно понимать так, что в атоме существуют как бы «силы отталкивания», которые удерживают электроны в состоянии равновесия. Условие равновесия определяет некоторое среднее расстояние электрона от ядра, т. е. размеры атома. С уменьшением этого расстояния согласно соотношению неопределенностей должен возрастать импульс электрона, т. е.

его кинетическая энергия. Это приводит к возрастанию средней «силы отталкивания» электрона от ядра. Вместе с тем надо сказать, что указанная картина имеет чисто квантовое происхождение и не связана с возникновением каких-то сил.

Если частица находится в ящике размером l , то этим размером определяется местоположение частицы, т. е. $\Delta x \approx l$. По соотношению неопределенности погрешность в определении импульса $\Delta p \geq \hbar/l$, так что энергия частицы $E = (\Delta p)^2 / 2m \geq \hbar^2 / 2ml^2$. Отсюда видно, что более точное определение местоположения частицы требует затрат энергии, которые возрастают с уменьшением l . Таким образом, чем в меньшей области локализована частица, тем большей энергией она обладает. Например, электроны в атомах (размеры порядка 10^{-8} см) обладают энергией около 10 эВ, а нуклоны в ядрах (размеры порядка 10^{-13} см) имеют энергию порядка нескольких МэВ.

Для правильного понимания соотношения неопределенностей необходимо иметь в виду, что понятия координаты и импульса частицы в классической механике основаны на многочисленных экспериментальных данных и являются понятиями макроскопическими. Со времен Ньютона считалось, что сформулированные им уравнения и понятия применимы как к макроскопическим телам, так и к микрообъектам. Однако с развитием физики оказалось, что нельзя автоматически переносить макроскопические понятия в область микроскопических масштабов. Это следует из того, что реальные микрочастицы обладают и корпускулярными, и волновыми свойствами. Поэтому нельзя говорить, например, что «импульс частицы в точке x равен p », потому что длина волны по своему определению не может быть функцией координаты, так что импульс частицы, обладающей волновыми свойствами, тоже не может зависеть от координат. Так же нельзя ответить на вопрос — какова частота колебаний маятника в данный момент времени, поскольку по определению частоты надо проследить за многими колебаниями маятника. Таким образом, на языке макроскопических понятий классической механики невозможно полностью описать явления микромира. Но мы, как существа макроскопические, не имеем другого языка. Поэтому соотношения неопределенностей выступают как объективная закономерность, которая устанавливает ограничения на применимость классических понятий координаты и импульса к описанию состояний микрочастицы. Количественно граница применимости классических представлений определяется постоянной Планка. Пока характерная величина с размерностью действия для некоторой системы велика по сравнению с постоянной Планка, эта система с большой точностью может описываться на языке классических представлений. В обратном случае система является чисто квантовой.

По воспоминаниям шведского физика Оскара Клейна (*O. Klein, 1894–1977*) Бор «... отнесся с истинным восхищением к этой замечательной формуле. А в то же время стало ему как-то не по себе, быть может, потому, что все это роилось в его собственной голове, да не успело оформиться до конца».

Действительно, соотношение неопределенностей оказалось «формульным» проявлением сформулированного Бором общего принципа дополнительности, а Бор по складу своего мышления мог прийти к конкретным результатам лишь после глубокого философского осмысления проблемы. Как отмечал ученик и друг Бора Леон Розенфельд (*L. Rosenfeld, 1904–1974*), «мы упорно стремились привести наши понятия в смиренную покорность опытным данным, полученным от природы. Это было идеалом Бора в науке, и никто из ее творцов никогда не отдавался ей с таким самопожертвованием».

Проведя тщательный анализ результатов Гейзенберга, Бор сделал ему ряд замечаний, о чем писал сам Гейзенберг:

«После завершения этой работы новые исследования Бора привели к точкам зрения, которые существенно углубили и уточнили изложенный в работе анализ допустимых квантово — механических связей. В связи с этим Бор обратил мое внимание на то, что я в некоторых рассуждениях не учел ряд важных особенностей. В первую очередь то, что неопределенности механических величин, возникающие при наблюдении, обусловлены не столько скачком, испытываемым соответствующей величиной, сколько требованием удовлетворять различным сторонам явления — корпускулярной и волновой». В дальнейшем Гейзенберг вспоминал: «Его задевало, что моя концепция не исходила из дуализма волн и частиц. Тем не менее, после нескольких недель довольно напряженных дискуссий мы не без содействия Оскара Клейна признали, что в основе наши точки зрения не расходятся и что соотношения неопределенностей представляют собой лишь частный случай более общего принципа дополнительности».

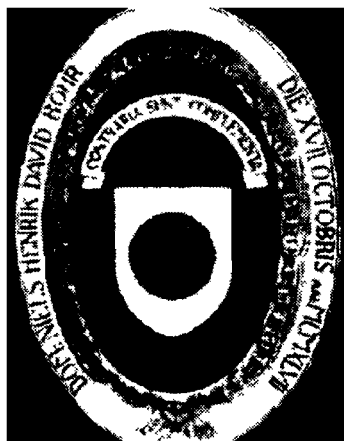
По мысли Бора, координату и импульс можно рассматривать как две половинки предмета, например, медали или монеты, которые можно сфотографировать либо спереди, либо сзади, но никогда с обеих сторон сразу. Между этими сторонами предмета никогда не бывает «конфликтов», они не исключают, а взаимно дополняют друг друга, поскольку они отражают свойства одного и того же предмета. Противоположности не борются, а сосуществуют друг с другом. Так же можно понимать и проявление корпускулярной и волновой природы микрочастиц. Они никогда не противостоят друг другу: в одних явлениях проявляются корпускулярные свойства частиц, а в других — волновые, но нет таких процессов, в которых одновременно присутствуют сразу оба эти «дополнительные» свойства. Классические понятия «частица» и «волна» взаимно исключают друг друга.



Бор, Гейзенберг и Паули

Частицы локализованы в пространстве и обладают свойством неделимости. Для волн характерна способность к интерференции и дифракции на препятствиях. Однако оказалось, что реальный микрообъект, который называют электроном, обладает и свойствами частицы, и свойствами волны. При этом квантовый объект — это не просто сумма свойств волны и частицы, так же как, например, кентавр — не результат простого сложения коня и человека, а качественно нечто новое. Поэтому Бор и считал, что корпускулярные и волновые свойства материи *не исключают, а дополняют* друг друга, так что противоречивость превращается в дополнительную. Дополняют друг друга прерывность и непрерывность, частица и волна, координата и импульс. Только, выявляя на опыте различные дополняющие друг друга свойства микрочастиц, можно составить наиболее полное представление о них. В этом состоит *принцип дополнительности* Бора. Как разъяснял Бор, *«...данные, полученные при разных условиях опыта, не могут быть охвачены одной-единственной картиной; эти данные должны скорее рассматриваться, как дополнительные в том смысле, что только совокупность разных явлений может дать более полное представление о свойствах объекта»*.

По Бору физическая картина явления и его математическое описание являются дополнительными друг к другу. При создании ясной физической картины пренебрегают деталями, тем самым снижается математическая точность. Наоборот, при точном математическом описании явления затрудняется его ясное физическое понимание. Надо сказать, что принцип дополнительности, как общая философская категория, был известен еще в древние времена.



Герб Нильса Бора

Например, Аристотель считал, что *«гармония — это смешение и сочетание противоположностей»*, а в древнем Китае существовала философия Тао, основу которой фактически составлял принцип дополнительности. Символ этой философии — *«инь — янь»* — это две равновеликие криволинейные фигуры, светлая и темная, которые вместе образуют круг — *«образ Мира»*. Когда Нильса Бора наградили высшим датским орденом Слона, он изобрел для себя герб, который должен был висеть в почетном зале Фредериксборгского замка Дании. В этом гербе он использовал символ *инь-янь*, обрамленный надписью на латинском языке *«Contraria sunt Complementa»* (*«Противоположности — суть дополнительности»*).

4.7. К ЧЕМУ ПРИВОДЯТ СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ?

Соотношения неопределенностей объективно отражают важные свойства микромира. Они привели к пониманию того, что микрочастицы *не имеют определенной траектории* своего движения, так как координата и импульс одновременно не существуют. Вместе с тем, при больших энергиях частицы (малых длинах волн де Бройля) возможно приближенное описание ее движения на языке классических траекторий. Применение понятия траектории к микрочастице, как и к волне, возможно при пренебрежении дифракцией. При распространении света в неоднородной среде это соответствует приближению геометрической оптики, которая справедлива при условии, что длина волны намного меньше характерного масштаба неоднородности L : $\lambda \ll L$. Отсюда следует, что возможность пренебрежения дифракцией волны де Бройля зависит как от импульса (энергии) частицы, так и от масштаба неоднородности, и определяется неравенством $pL \gg h$.

Например, при падении на кристалл высокоэнергетичных электронов, ускоренных до энергии 1 ГэВ , дифракционная картина не наблюдается, так как в этом случае длина волны де Бройля очень мала — около 10^{-13} см . Вполне справедливым оказывается также расчет по классической теории траекторий альфа — частиц в опытах Резерфорда и траекторий электронов в электронно-лучевых трубках. По этой же причине можно приближенно говорить о траектории быстро движущейся частицы в камере Вильсона (*Ch. Wilson, 1869–1959*), созданной в 1912 году.

В самом деле, след, например, электрона в камере Вильсона представляет собой капельки жидкости, которые образуются на созданных электронном ионах. Размер этих капелек около 10^{-4} см . Такова же, очевидно, и неопределенность в координате электрона. Неопределенность в компоненте скорости, перпендикулярной направлению движения электрона, можно оценить по формуле $\Delta v_x = \Delta p_x / m \approx \hbar / m \Delta x \approx 10^{-27} / 10^{-27} \cdot 10^{-4} = 10^4 \text{ см/с}$. Следы в камере Вильсона оставляют лишь достаточно быстрые электроны, скорость которых больше $v \approx 10^9 \text{ см/с}$. Таким образом, погрешность в определении скорости является относительно малой: $\Delta v_x \ll v$. Это и позволяет говорить приближенно о траектории быстро движущихся заряженных частиц. (О том, как рассчитываются треки заряженных частиц в камере Вильсона, см. *А. М. Митерев, УФН, 172(10), с. 1131, 2002*).

Соотношения неопределенностей приводят также к другому важному выводу, что *микрочастицы не могут находиться в состоянии полного покоя*, так как иначе можно было бы точно одновременно определить их положения и импульсы. Энергия микрочастицы определяется и измеряется лишь как полная энергия, потому что деление полной энергии частицы на кинетическую и потенциальную не имеет смысла.

Бор первый отметил, что *свойства микрообъекта неотделимы от средств наблюдения*. Такой вывод вытекает из принципа дополнительности, который, как разъяснял Бор, «*позволяет, с одной стороны, охватить характерную для квантовых процессов черту неделимости и, с другой стороны, разъяснить существующие в этой области особенности постановки задачи о наблюдении*. Для этого решающим является признание следующего основного положения: *как бы далеко ни выходили явления за рамки классического физического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий*».

Обоснование этого состоит просто в констатации точного значения слова „эксперимент“. Словом „эксперимент“ мы указываем на такую ситуацию, когда мы можем сообщить другим, что именно мы сделали и что именно мы узнали. Поэтому экспериментальная установка и результаты наблюдений должны описываться однозначным образом на языке классической физики. Из этого основного положения ... можно сделать следующий вывод:

Поведение атомных объектов невозможно резко отграничить от их взаимодействия с измерительными приборами, фиксирующими условия, при которых происходят явления» (Н. Бор. Избранные научные труды. М.: Наука, 1971, Т. 2, с. 406).

Ученики Бора Меллер и Пиль писали: *«Какой бы странной и даже шокирующей ни казалась нам эта ситуация, мы видим, что всякий элемент противоречия или мистики исчезнет, как только мы поймем, что физическое явление не может быть выражено верным понятием, если не определена та экспериментальная установка, которая фиксирует это явление. Это Бор неоднократно подчеркивал».*

Объекты наблюдения — это микрочастицы — электроны, фотоны и пр. Они описываются законами квантовой физики. Средства наблюдения являются макроскопическими — это экспериментальные установки, например, экран со щелями, кристалл, фотопластинка и т. д. Они описываются с помощью законов классической физики. Измерения или наблюдения макро- и микрообъектов существенно отличаются друг от друга. В классической физике в результате измерения состояние измеряемого объекта не изменяется (или практически не изменяется). Например, измерение скорости движущегося автомобиля дорожным патрулем никак не изменяет состояния автомобиля (и водителя, если он не нарушил правил движения). Никак не изменяется также состояние Земли при измерении ее положения на траектории вращения вокруг Солнца, и т. д. При измерении же или наблюдении микрообъекта происходит не только изменение, но и разрушение его прежнего состояния. По выражению Фейнмана: *«Наблюдая явление, нельзя хотя бы слегка не нарушить его ход, и без учета этого нарушения теория не может стать последовательной».* Любое измерение в микромире является актом вторжения, которое изменяет состояние микросистемы. Например, при измерении положения электрона в результате взаимодействия с гамма — квантом электрон приобретает дополнительный импульс. Это значит, что первоначальное состояние электрона нарушается. Полностью разрушается также прежнее состояние дифрагировавшего электрона при регистрации его, например, с помощью фотопластинки и т. д. Отметим, что согласно соотношениям неопределенностей в эксперименте может быть измерена лишь одна из пары взаимно дополняющих переменных. Поэтому для измерения значения желаемой переменной экспериментатор должен иметь соответствующее регистрирующее устройство для измерения именно данной величины. Всякий раз, когда экспериментатор хочет одновременно измерить какие-либо дополнительные друг другу величины, результат будет зависеть от способа наблюдения. Это свойство квантовых объектов известный российский физик В. А. Фок (1898–1974) называл *«относительностью к средствам наблюдения».* С теоретической точки зрения регистрация микрообъекта, например, с помощью фотопластинки, означает, что его волновая функция мгновенно обращается в нуль

всюду вне области регистрации. Это называется *редукцией* или *коллапсом* волновой функции (Б. Б. Кадамцев. Динамика и информация. М.: 2000). Ясно, что никакое физическое поле не может обладать такими свойствами. Скачкообразное изменение волновой функции связано с тем, что при измерении накладываются дополнительные условия. Например, при регистрации электрона с помощью фотопластинки волновая функция определяется при условии, что почернело данное зерно фотопластинки. Необходимо отметить, что до сих пор проблема измерений в квантовой теории, особенно в связи с новыми экспериментальными возможностями является предметом острых дискуссий (УФН, 170(6), с. 631, 2000; УФН, 171(4), с. 437, 2001; УФН, 172(7), с. 843, 2002).

В классической физике справедлив *принцип причинности*, который предполагает, что если задано состояние некоторой системы в начальный момент времени, то ее состояние во все последующие моменты времени может быть полностью и однозначно определено. Эту веру в возможность однозначных предсказаний выразил французский физик и математик Пьер Лаплас (P. S. M. Laplace, 1749–1827): *«Разум, который для какого-нибудь данного момента знал бы все силы, действующие в природе и относительное расположение ее составных частей, если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во Вселенной и самого легкого атома, для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами...»*. Таким образом, по Лапласу, зная координаты и скорости всех частиц, можно предсказать будущее Вселенной. Так же однозначны и предсказания классической электродинамики. Причинность в классической физике называли *детерминизмом*. Причинности в таком понимании в микромире нет. Для микрочастиц ни в какой момент времени нельзя точно указать их координаты и импульсы — это не позволяют сделать волновые свойства частиц. И это не результат незнания или несовершенства экспериментальных устройств, а свойство самой природы. Природа таит в микропроцессах различные возможности. Какая из них осуществится в результате измерения, заранее точно не известно. Квантовая механика имеет только возможность вычислять вероятности различных вариантов. Состояние квантовой системы максимально полно описывается с помощью волновой функции. Волновая функция заменяет классическое состояние, которое задается координатами и импульсами. Ее изменение со временем описывается вполне детерминированным уравнением Шредингера, так что заданием волновой функции в начальный момент времени она определяется и в последующие моменты времени. Это можно рассматривать, как проявление принципа причинности в квантовой механике. Вместе с тем физический смысл имеет не сама волновая функция, а квадрат ее модуля. Это связано с тем, что волновая функция описывает не осуществленное состояние микрообъекта, а потенциально возможные его состояния.

Невозможность одновременного задания координаты и импульса электрона некоторые физики и философы восприняли как отсутствие причинной связи явлений в микромире. Такой подход стали называть *индетерминизмом*. По этому поводу Ланжевен говорил: *«Если природа не дает точного ответа на поставленный вопрос об электроном, уподобляемом частице классической механики, то слишком претенциозно с нашей стороны заключить отсюда: детерминизм не существует. Будет более правильно сказать: вопрос плохо поставлен, электрон не уподоблям частице классической механики»*. Смысл принципа причинности в квантовой механике, конечно, разъясняли ее основатели. Гейзенберг писал: *«В строгой формулировке закона причинности, — если нам точно известно начальное состояние, то можно однозначно определить ее будущее состояние, — следует отказаться не от следствия, а от посылки. Мы не можем принципиально знать точно начальное состояние»*. А Макс Борн говорил: *«Движение частиц следует законам вероятности, сама же вероятность распространяется в согласии с законами причинности»*. И дальше он уточнял: *«Часто встречающееся утверждение, будто современная физика утратила причинность, совершенно необоснованно. Это верно, что современная физика устранила либо модифицировала многие традиционные идеи; но она перестала бы быть наукой, если бы прекратила поиски причин явлений»*.

Приведем еще слова Паули: *«Открытие волн материи де Бройлем, матричной механики Гейзенбергом и общее волново — механическое дифференциальное уравнение Шредингера, позволившее установить связь между этими воззрениями, произвели последний решающий поворот в квантовой теории. Принцип неопределенностей Гейзенберга и примыкающие к нему принципиальные пояснения Бора завершили предварительное построение основ этой теории. Эти основы непосредственно связаны с двойственной (корпускулярной и волновой) природой света и материи и приводят к давно (но тщетно) искавшемуся решению задачи непротиворечивого и полного описания относящихся сюда явлений. Это решение приобретается ценой отказа от однозначной объективируемости процессов природы, т. е. от классического пространственно-временного и причинного описания природы, которое существенным образом покоится на однозначной разделимости явления и средств его наблюдения»*.

4.8. «БОЕВОЕ КРЕЩЕНИЕ» КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

В октябре 1927 года произошло важное событие в истории физики. В Брюсселе на V Сольвеевском конгрессе собрались ведущие физики того времени, чтобы обсудить состояние квантовой теории. Бор выступил с докладом, в котором он изложил квантовые идеи на основе принципа дополнителности и соотношения неопределенностей. Как впоследствии вспо-

минал Гейзенберг, этот конгресс завершил *«легендарную эпоху в создании атомной теории... Дискуссия быстро превратилась в дуэль между Эйнштейном и Бором по вопросу о том, в какой мере квантовую теорию того времени можно было рассматривать как окончательное решение проблем, вызывавших в течение многих десятилетий ожесточенные споры»*.

«Боевым крещением» квантовой механики назвал Гейзенберг то, что происходило на конгрессе. А Леон Розенфельд (*L. Rosenfeld, 1904–1974*) окрестил происходившее «Матчем века». Одну «команду» составляли Эйнштейн, Лоренц, Планк, Шредингер, де Бройль, другую — Бор, Гейзенберг, Борн, Дирак, Паули, Ферми, Эренфест. Главное на конгрессе происходило не в зале заседаний, а в кулуарах, за столиками, на дорожках Королевского парка.

Эйнштейн и Бор впервые встретились в Берлине весной 1920 года. Эйнштейну в то время был 41 год, а Бору — 34. Конечно, они знали друг друга, но личная встреча произвела на обоих огромное впечатление. Вскоре после знакомства Эйнштейн писал Бору: *«Не часто в моей жизни человеческая личность доставляла мне такую радость самим фактом своего существования»*. В свою очередь Бор ответил Эйнштейну: *«Встретить Вас и говорить с Вами было одним из сильнейших переживаний в моей жизни»*.

И вот два симпатизирующих друг другу гиганта мысли стали непримиримыми идейными противниками. По воспоминаниям Бора, Эйнштейн *«выразил глубокую тревогу по поводу того, что в квантовой механике так далеко отошли от причинного описания в пространстве и времени»*. Острая дискуссия между Эйнштейном и Бором была, по существу, результа-



Эйнштейн и Бор

том столкновения двух разных философских подходов в физике, в теории познания. Эйнштейн исходил из «критерия реальности» классической физики с ее однозначной детерминированностью. Бор же стоял на позициях более гибкой философии, вобравшей в себя новые факты квантовой физики, и вооруженный принципом дополнительности.

На конгрессе Эйнштейн каждое утро предлагал Бору очередной хитроумный мысленный эксперимент или парадокс, который, как думал Эйнштейн, опровергает соотношения неопределенностей и который, таким образом, не является обязательным законом природы. И в тот же вечер Бор с гениальной изобретательностью находил изъяны в «эксперименте» Эйнштейна, тем самым доказывая справедливость соотношений неопределенностей и самих основ квантовой механики. Все участники конгресса с напряженным вниманием следили за их поединком. Как впоследствии писал Бор: *«Центральным вопросом, вокруг которого шел спор, был вопрос о том, исчерпывает ли квантово-механическое описание то, что можно действительно наблюдать, или же, как настаивал Эйнштейн, анализ можно вести дальше; и нельзя ли в последнем случае достигнуть более полного описания явлений путем учета детального баланса энергии и количества движения в элементарных процессах»*. Спор между ними продолжился и на следующем Сольвеевском конгрессе через три года, а в печати — до 1935 года. Вспоминая о своих дискуссиях с Эйнштейном, много лет спустя Бор говорил: *«Это был трагический момент. Ведь если бы Эйнштейн оказался прав, то все рухнуло бы...»*. В конце концов, Эйнштейн убедился в логической непротиворечивости позиции Бора и «копенгагенской» интерпретации квантовой механики. Он писал: *«Надо признать, что новая физическая концепция обязана своим происхождением не взлету фантазии, а непреодолимой силе опытных фактов. Все попытки представить частицу и волновые свойства, появляющиеся в явлениях, связанных со светом и веществом, непосредственно пространственно-временной моделью, до сих пор кончались неудачно. Как убедительно показал Гейзенберг, всякое утверждение о строго детерминистской структуре природы с эмпирической точки зрения окончательно исключается из-за атомистического строения приборов, применяемых в наших экспериментах. Очевидно, никакое будущее познание не сможет заставить физиков отказаться от нашего современного статистического теоретического обоснования физики в пользу детерминистского обоснования, которое изучало бы непосредственно физическую реальность... Некоторые физики, в том числе и я сам, не могут поверить, что мы раз и навсегда должны отказаться от идеи прямого изображения физической реальности в пространстве и времени или что мы должны согласиться с мнением, будто явления в природе подобны игре случая. Каждому дозволено выбрать направление приложения своих усилий, и каждый человек может найти утешение в пре-*

красном изречении Лессинга, что поиск истины значительно ценнее, чем обладание ею».

И все же Эйнштейн никак не мог согласиться с вероятностным характером предсказаний квантовой механики. Он говорил: «Я не верю, что господь бог играет в кости». В связи с этим друг Эйнштейна Эренфест упрекал его в том, что его критика интерпретации квантовой механики очень похожа на критику теории относительности с точки зрения «здорового смысла». До последних дней своей жизни Эйнштейн не оставлял попыток доказать, что вероятностный характер квантовой механики обусловлен ее неполнотой. Предполагалось, что вероятности в квантовой механике связаны с тем, что в ней не учитываются некие скрытые параметры. Идея о скрытых параметрах вызвала ожесточенные дискуссии в физике. Впервые американский математик и физик Джон фон Нейман (*J. Neumann*, 1903–1957) в 1932 году показал, что эта идея противоречит принципам квантовой механики. В 1965 году Джон Белл (*J. S. Bell*) вывел знаменитые неравенства и указал конкретные эксперименты, в которых можно заметить различие между предсказаниями квантовой механики и теории скрытых параметров. Эксперименты такого рода (*A. Aspect et al. Phys. Rev. Lett.* **49**, p. 91, 1982; *F. Röhrich, Science*, **221**, p. 125, 1983) полностью подтвердили справедливость квантовой механики и ее вероятностную природу. Однако до сих пор не прекращаются споры о скрытых параметрах (*A. В. Белинский. УФН*, **164**(4), с. 435, 1994).

Современные многочисленные эксперименты позволяют сделать вывод, что опытные данные вполне согласуются с предсказаниями квантовой механики. Таким образом, квантовая механика, возникшая на основе опытных фактов и являющаяся обобщением классической механики, сама непосредственно подтверждена на опыте. Вместе с тем, утверждать, что квантовая механика незыблема, особенно в области сверхмалых масштабов, значит приходить в противоречие с принципами, которыми руководствовались ее создатели.

Интерпретацию квантовой механики, которую отстаивал Бор, называют *копенгагенской интерпретацией*. С 1927 года де Бройль развивал другую интерпретацию, основанную на *концепции волны-пилота*. Помимо этого существуют *другие интерпретации* квантовой механики (см., например, *М. А. Марков. О трех интерпретациях квантовой механики*. М.: Наука, 1991; *H. Everett. Rev. Mod. Phys.* **29**, p. 254, 1957; *D. Home, M. A. В. Whitaker. Phys. Reports.* **210**(4), p. 2231, 1992; *V. P. Belavkin. Rep. Progr. Phys.* **65**, p. 353, 2002). Отметим также *третий вариант квантовой механики*, разработанный в 1948 году Ричардом Фейнманом (*R. Feynman*, 1918–1988), на основе представлений об интегрировании по траекториям.

4.9. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Квантовая механика стала последовательной теорией атомных систем. Гейзенберг в 1926 году не только блестяще решил проблему атома гелия, но и указал общий метод исследования систем тождественных частиц. Системы тождественных частиц рассматривал также Дирак. В 1927 году немецкие физики Гайтлер (*W. Heitler*, 1904–1981) и Лондон (*F. London*, 1900–1954) исследовали проблему образования молекулы водорода, заложив тем самым основы нового направления — квантовой химии. Была разработана теория альфа — распада (*Г. А. Гамов*, 1904–1968), создана квантовая механика электронов в кристаллической решетке (*F. Bloch*, 1905) и т. д.

Вместе с тем исследования взаимодействия между атомными системами и электромагнитным излучением проводились до 1927 года полуклассическими методами. Это значит, что атомные системы рассматривались как квантовые, а электромагнитное излучение как классическое поле, описываемое уравнениями Максвелла. Поглощение и индуцированное испускание излучения еще можно было как то объяснить таким способом, но спонтанное испускание изолированного атома совершенно невозможно было понять, потому что возбужденное состояние в квантовой механике считается стационарным, т. е. существующим бесконечно долго. Поэтому была необходима последовательная теория, которая рассматривала бы и электромагнитное поле как квантовую систему. Такую теорию создали Дирак, Йордан и Паули для поля без источников, и Гейзенберг и Паули — с источниками. Затем квантовая теория электромагнитного поля — *квантовая электродинамика* была развита в работах Клейна, Гейзенберга, В. А. Фока, Розенберга, Л. Д. Ландау (1908–1968) и др. В настоящее время существует достаточно хорошо разработанная *квантовая теория поля*, созданная трудами Фейнмана (*R. Feynman*, 1918–1988), Швингера (*J. Schwinger*, 1918), Томонага (*S. Tomonaga*, 1906–1979), Дайсона (*F. Dyson*, 1923), Н. Н. Боголюбова (1909–1992) и др.

Уравнение Шредингера, являющееся основой квантовой механики атомных систем, обладает тем недостатком, что оно не учитывает релятивистские эффекты и спин электрона. В 1927 году Паули расширил границы применимости нерелятивистской квантовой механики с помощью введения двухкомпонентной волновой функции (*Z. Phys.* 43, p. 601, 1927). Наряду с пространственными координатами электрона в волновой функции он ввел спиновую переменную, принимающую два значения $s_z = \pm \hbar/2$. Это приводит к необходимости вместо одной волновой функции рассматривать две, отвечающие двум проекциям спина. Кроме того, им были введены операторы спина (матрицы Паули) и рассмотрены свойства волновых функций при вращении системы координат. Оказалось, что двухкомпонентная волновая функция при вращении вокруг некоторой оси на угол 2π

не возвращается к прежнему значению, а меняет свой знак. Развитие этих идей привело к созданию *спиринового анализа*.

В 1928 году Дирак опубликовал статью «Квантовая теория электрона» (Proc. Roy. Soc. A, 117, p. 610), которая сыграла важную роль в дальнейшем развитии квантовой теории. Он писал: «Новая механика, примененная к проблеме структуры атома с точечно-заряженным электроном, не дает результатов, согласующихся с опытом. Расхождение заключается в некоторой „двузначности“ явлений — наблюдаемое число стационарных состояний электрона в атоме вдвое больше даваемых теорией. Для устранения этой трудности Гаудсмит и Уленбек высказали идею о существовании у электрона углового момента, равного половине \hbar -кванта, и магнитного момента, равного магнетону Бора. Эта модель электрона была введена в новую квантовую механику Паули и Дарвиным, которые смогли таким образом объяснить в первом приближении экспериментальные данные о спектре водородоподобных атомов. Остается вопрос, почему Природе надо было выбрать такую модель электрона, вместо того чтобы удовлетвориться точечным зарядом. Мы найдем некоторую незавершенность в предыдущих методах применения квантовой механики к точечно — заряженному электрону, после устранения которой полностью проявляется двузначность явлений, наблюдаемых на опыте. В настоящей статье будет показано, что эта незавершенность связана с не учетом релятивизма и некоторых общих положений теории преобразований в квантовой механике».

Введя шесть матриц четвертого ранга, Дирак написал релятивистское волновое уравнение — знаменитое уравнение Дирака. Это уравнение автоматически содержало в себе спин электрона и приводило в первом приближении к тонкой структуре термов, которая была объяснена ранее Паули и английским физиком-теоретиком Чарлзом Дарвиным (Ch. Darwin, 1887–1962). Чрезвычайно важными стали выводы из теории Дирака о существовании частиц, обладающих массой электрона и положительным элементарным зарядом. Такие частицы американский физик Карл Андерсон (C. Anderson, 1905–1991) назвал *позитронами*. Они были открыты Андерсоном в 1932 году (Science, 76, p. 238) и независимо Патриком Блэккетом (P. M. S. Blackett, 1897–1974) и Джузеппе Оккиалини (G. P. S. Occhialini, 1907) в 1933 году (Proc. Roy. Soc. A, 139, p. 699). Так впервые было доказано, что в природе существует *античастица* электрона — позитрон e^+ . Эти частицы при столкновении способны аннигилировать: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$, и наоборот, γ -квант может распасться на пару — электрон и позитрон. На рис. 4.6 представлен первый снимок Андерсона, на котором виден след позитрона в камере Вильсона (след искривлен, поскольку камера находилась в магнитном поле).

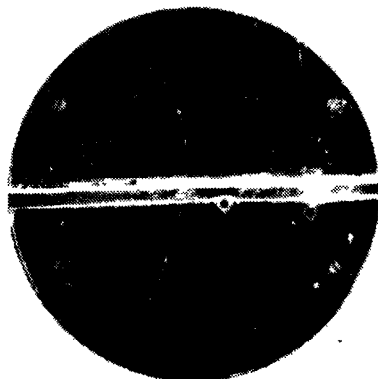


Рис. 4.6

В 1955 году в Беркли на ускорителе был открыт *антипротон* (O. Chamberlain, E. Segre, et al. Phys. Rev. **100**, p. 947, 1955), а затем, так называемые «странные частицы». Это лямбда — частицы, K — мезоны и др. На Серпуховском ускорителе были открыты *антитритий* и *антигелий*.

Так что теперь никто не сомневается в существовании *антивещества* в природе.

Еще в 1920 году Резерфорд впервые высказал идею о возможности существования частиц с массой протона и нулевым электрическим зарядом — *нейтронов*. И лишь в 1932 году ученик Резерфорда Джеймс Чэдвик (J. Chadwick, 1891–1974) опубликовал статью (Proc. Roy. Soc. A, **136**, p. 692), в которой он, анализируя экспериментальные данные, пришел к выводу, что такие частицы действительно имеются в природе. Чэдвик предполагал, что нейтрон представляет собой тесную комбинацию протона и электрона. Это была ошибочная идея, потому что согласно опытам протон имеет спин $\frac{1}{2}$ и является элементарной частицей. В настоящее время считается, что нейтрон в свободном состоянии нестабилен и распадается примерно через 20 минут на протон и электрон.

До открытия нейтрона предполагалось, что ядра атомов состоят из протонов и электронов. Считалось, что ядро с зарядом Z и массовым числом M должно содержать M протонов и $M - Z$ электронов. Такое представление часто приводило к противоречию с экспериментальными данными, в частности, существовала так называемая «азотная катастрофа». Этот парадокс заключался в следующем: ядро атома азота ($Z = 7$, $M = 14$) должно бы содержать 21 ферми-частицу, и, следовательно, подчиняться статистике Ферми—Дирака. Между тем опытные данные показывают, что ядро атома азота подчиняется статистике Бозе—Эйнштейна. Это противоречие и подобные ему «парадоксы» автоматически были устранены в 1932 году после предположения российского физика Д. Д. Иваненко (1904–1994) и Гей-

зенберга о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Протонно-нейтронное строение ядра естественно объясняло также существование изотопов элементов.

С открытием протонно-нейтронной структуры ядра встал вопрос о силах, удерживающих протоны и нейтроны внутри ядра. Ясно, что эти силы не могут иметь электромагнитное происхождение. Так возникло представление о новом виде фундаментальных сил в природе, действующих между элементарными частицами, входящими в состав ядра — *нуклонами*. С этими силами связывают «*сильное взаимодействие*», имеющее короткодействующий характер: если протоны и нейтроны находятся на расстоянии, превышающем размеры атомного ядра (порядка 10^{-13} см), взаимодействие между ними исчезает. В 1935 году японский физик Юкава (*H. Yukawa*, 1907–1981) предположил, что такое свойство сильного взаимодействия связано с обменом между нуклонами частицами с массой порядка 200 масс электрона. Такие частицы Юкава назвал «*мезонами*». Через некоторое время в космическом излучении была найдена частица с массой $206 m_e$. Сначала с радостью считали, что это и есть мезон, который предсказал Юкава. Однако вскоре выяснилось, что это не так. Было установлено, что эта частица (μ -мезон) является результатом распада другой более тяжелой частицы — π -мезона, которая и представляет собой предсказанный Юкавой мезон.

Наряду с сильным взаимодействием было открыто и другое фундаментальное взаимодействие — «*слабое взаимодействие*», проявляющееся, например, при β -распаде нейтрона. Теорию β -распада разработал Ферми в 1935 году. Анализ распада нейтрона привел Паули к предположению о существовании еще одной нейтральной частицы со спином $\frac{1}{2}$ — *нейтрино*. Таким образом, в 30-е годы XX столетия было установлено, что в природе существуют по меньшей мере четыре вида фундаментальных взаимодействий: электромагнитное, гравитационное, сильное и слабое.

Последнее время в теории элементарных частиц достигнуты большие успехи: за прояснение квантовой структуры так называемых электрослабых взаимодействий Герардус 'т Хоофт (*G. 't Hooft*) и Мартинус Вельтман (*M. J. G. Veltman*) были удостоены Нобелевской премии 1999 года.

Современные физика атомного ядра и физика элементарных частиц являются самостоятельными и развивающимися разделами физики, которые имеют свою историю.

4.10. «ПАРАДОКСЫ» КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Несмотря на многочисленные разъяснения Бора и несомненные успехи квантовой механики, Эйнштейн не признавал ее как законченную теорию. 15 мая 1935 года в журнале *Physical Review* (vol. 47, p. 777) была опубли-

ликована знаменитая статья Эйнштейна, Подольского и Розена с названием «Можно ли считать, что квантово — механическое описание физической реальности является полным?» Ее часто цитируют как «статья EPR». Проведя анализ поведения системы, состоящей из двух подсистем, которые взаимодействуют лишь в течение определенного промежутка времени, авторы — EPR — пришли к выводу, что квантово — механическое описание реальности не является полным. Эта работа немедленно подверглась критике Бора в его статье под таким же названием. Опираясь на принцип дополнительности, с помощью мысленных экспериментов Бор показал, что выводы EPR ошибочны. Одним из первых, кто поддержал идеи EPR, был Шредингер, который предложил идею, известную как парадокс «шредингеровского кота» (*Die Naturwissenschaften*, 48, 807, 1935; перевод: Успехи химии, 5, 30, 1936).

Шредингер писал: «Посадим кота в стальной сейф вместе с адской машиной (защищенной от кота). В счетчик Гейгера положена крупица радиоактивного вещества, столь малая, что за час может распасться один из атомов, но с той же вероятностью может не распасться ни один. Если атом распадается, то счетчик через реле приведет в действие молоточек, который разобьет колбу с синильной кислотой. Предоставив эту систему самой себе в течение часа, мы скажем, что кот еще жив, если за это время не распался ни один атом. Первый же распад привел бы к отравлению кота. Ψ -функция всей системы выразила бы это тем, что живой и мертвый кот (с позволения сказать) смешаны или размазаны в одинаковых пропорциях».

До сих пор продолжаются дискуссии, связанные с парадоксами EPR и «шредингеровского кота». Эти парадоксы стимулировали постановку новых принципиальных вопросов, касающихся самих основ квантовой механики, и привели к рассмотрению так называемых запутанных квантовых состояний (*entangled states*) (И. В. Баргагин, Б. А. Гришанин, В. Н. Задков. УФН, 171(6), с. 625, 2001). В частности, согласно теории длина волны де Бройля ансамбля N фотонов, находящихся в запутанных квантовых состояниях, должна быть равна λ/N , где λ — длина волны каждого фотона. Пара таких фотонов называется бифотоном (*Phys. Rev. Lett.* 89, p. 213601, 2002; А. В. Бурлаков и др. ЖЭТФ, 95, № 4, с. 639, 2002).

В квантовой механике часто дискутируется вопрос о роли наблюдателя. Наблюдение совершенно невозможно без воздействия на исследуемую квантовую систему и изменения ее состояния. Считалось, что наблюдения и вызываемые ими возмущения приводят к замедлению квантовых процессов. Это утверждение называют квантовым эффектом Зенона. В соответствии с этим эффектом распады квантовых состояний (например, спонтанный переход атома на более низкий энергетический уровень) должны затягиваться. Однако последнее время приходят к выводу, что в большин-

стве случаев наблюдения не замедляют, а ускоряют распады (*G. Kurizki, A. Kofman, Nature, 405, p. 546, 2000*).

Отметим также своеобразный квантовый эффект, который называют *эффектом Ааронова—Бома* (*V. Aharonov, D. Bohm. Phys Rev. 115, p. 485, 1959*). Суть его в том, что квантовая заряженная частица, движущаяся в области, где отсутствует постоянное магнитное (или электрическое) поле, но вектор-потенциал (или скалярный потенциал) отличен от нуля, испытывает воздействие. (Подробнее см., например, *А. Г. Чирков, А. Н. Агеев. ЖТФ, 71(2), с. 16, 2001*).

В наше время на стыке квантовой механики, теории информации и программирования, дискретной математики, лазерной физики и спектроскопии возникло новое направление в физике — *квантовая информация*. Оно включает в себя вопросы квантовых вычислений, квантовых компьютеров, квантовой телепортации и квантовой криптографии (*Б. Б. Кадомцев. УФН, 164(5), с. 449, 1994; С. Я. Килин. УФН, 169(5), с. 507, 1999; В. В. Белокуров, О. Д. Тимофеевская, О. А. Хрусталеv. Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. Ижевск: 2000*).

То, что я понял, — прекрасно; из этого я заключаю, что и остальное, чего я не понял, — тоже прекрасно.

Сократ

ГЛАВА 5 ✦ СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АТОМЕ

5.1. ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Согласно теории Бора электроны в атоме обращаются вокруг ядра по круговым или эллиптическим стационарным орбитам, которые могут быть определены с помощью квантовых постулатов. Однако последовательная квантовая теория полностью отвергает возможность существования каких-либо орбит электронов в атоме. Как же тогда можно представить расположение электронов в атоме? Квантовая механика учит, что, зная волновую функцию, можно найти вероятность того, что электрон в данный момент времени находится в некотором объеме вблизи данной точки пространства. Другими словами, квантовая теория позволяет определить вероятное распределение электронного заряда вокруг ядра. Это распределение зависит от состояния, в котором находится электрон. Состояния электрона в атоме характеризуются четырьмя квантовыми числами n , ℓ , m_ℓ , m_s , соответственно, главным квантовым числом, орбитальным (азимутальным) квантовым числом, магнитным орбитальным квантовым числом и магнитным спиновым квантовым числом. Согласно принципу Паули в состоянии с фиксированной четверкой этих чисел может находиться лишь один электрон. Число m_s принимает два значения: $\pm 1/2$. Поэтому в состоянии с фиксированной тройкой квантовых чисел n , ℓ , m_ℓ может находиться два электрона. Если фиксированы числа n , ℓ , то число электронов в состоянии с такими числами определяется удвоенным числом значений, которые принимает число m_ℓ , т. е. $2(2\ell + 1)$.

Совокупность одноэлектронных состояний с фиксированными значениями квантовых чисел n , ℓ называют *электронной оболочкой атома*, при этом состоянию с данным значением орбитального квантового числа приписывают определенные буквенные обозначения: если число $\ell=0$, то говорят, что это *s-состояние*, если $\ell=1$, то *p-состояние*, если $\ell=2$, то *d-состояние* и т. д. Такие буквенные обозначения состояний исторически связаны с названиями спектральных серий: *s* — sharp (резкая), *p* — principal (главная), *d* — diffuse (диффузная), *f* — fundamental (фундаментальная) и т. д. В *s-состоянии* может находиться не более двух электронов, в *p-состоянии* — не более 6 электронов, в *d-состоянии* — не более 10 электронов и т. д. Поскольку электронная оболочка определяется фиксированными значениями чисел n , ℓ , то говорят об оболочках $1s$, $2s, 2p$, $3s, 3p, 3d$, $4s, 4p, 4d, 4f$ и т. д. Такие представления о распределении электронов называют *оболочечной моделью атома*. Распределение электронов по оболочкам определяет *электронную конфигурацию* атома. В атоме водорода в основном состоянии его единственный электрон находится на оболочке $1s$. Она соответствует наибольшей связи электрона с ядром. Электронная конфигурация атома водорода изображается, как $1s^1$. Единица сверху показывает, что в этой оболочке находится один электрон. Следующий атом — атом гелия имеет электронную конфигурацию $1s^2$, так что в атоме гелия оболочка $1s$, как говорят, полностью завершена. Этим определяется инертность атома гелия. Третий электрон следующего элемента — лития находится на оболочке $2s$, и электронная конфигурация атома лития — $1s^2 2s^1$. Так последовательно при переходе от одного элемента периодической системы к другому происходит постепенное заполнение электронных оболочек атомов. Например, атом азота в основном состоянии имеет конфигурацию $1s^2 2s^2 2p^3$, атом серы — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$ и т. д. Сумма верхних чисел показывает число электронов в атоме, которое определяет заряд ядра и, следовательно, место элемента в периодической системе Менделеева. Однако заполнение электронных оболочек атомов не всегда происходит в соответствии с указанным «правильным» порядком. Многие исключения из этого правила связаны с тем, что оно основано на довольно идеализированных предположениях, которые не достаточно учитывают изменения характера взаимодействия электронов с ядром по мере увеличения числа электронов в атоме (и заряда ядра). Погрешности оболочечной модели связаны также с тем, что она не учитывает корреляции между электронами и ряд релятивистских взаимодействий.

Мысленно присоединяемый электрон к каждому последующему элементу в периодической системе «выбирает» наиболее энергетически вы-

годное состояние, т. е. состояние, в котором он сильнее всего связан с атомным остовом. Например, атом аргона ($Z = 18$) имеет электронную конфигурацию — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Казалось бы, что 19-й электрон следующего элемента — калия, относящегося к группе щелочных металлов, должен находиться на оболочке $3d$, однако, энергетически выгодным для него оказывается оболочка $4s$, так что электронная конфигурация атома лития — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$. Таким образом, для атома лития оболочка $3d$ является пустой. Пуста эта оболочка и для следующего элемента — кальция, 20-ый электрон которого завершает оболочку $4s$. Заполнение внутренней оболочки $3d$ начинается с 21-го элемента — скандия. Имеются также отклонения в группе редкоземельных элементов и других сложных атомах. Причины всех отклонений от «правильного» порядка заполнения электронных оболочек полностью объясняются современной квантовой теорией.

Электронная конфигурация дает картину распределения электронов по оболочкам атомов. Однако этого оказывается недостаточно для описания состояния атома. Необходимо еще знать, как складываются орбитальные и спиновые моменты отдельных электронов и каков полный механический момент атома (без учета квантовых состояний ядра). Сложение механических моментов может происходить по-разному. Для легких атомов с достаточно высокой точностью сложение моментов осуществляется по схеме LS — связи. В этом случае спин-орбитальное взаимодействие для отдельных электронов атома является достаточно слабым. Тогда орбитальные моменты электронов складываются, образуя полный орбитальный момент импульса \vec{L} . Складываются также спиновые моменты электронов, и образуется полный спин \vec{S} . Сумма этих моментов определяет полный момент импульса атома \vec{J} . При этом вклад внутренних степеней свободы ядра атома считается пренебрежимо малым. По схеме LS — связи состояния атома описываются квантовыми числами L, S, J, M_J , где M_J — проекция полного момента импульса атома на выделенное направление.

Для более тяжелых атомов спин-орбитальное взаимодействие для отдельных электронов становится существенным. В этом случае используется $j-j$ -схема сложения электронных моментов: сначала складываются орбитальный и спиновый моменты i -го электрона, и образуется его полный механический момент \vec{j}_i . Сложение полных моментов импульса всех электронов приводит к полному моменту атома \vec{J} . В рамках этой схемы состояния атома определяется квантовыми числами J, M_J , а также полными моментами отдельных электронов для данной электронной конфигурации.

В реальном атоме сложение электронных моментов может происходить по более сложной схеме (подробнее см. *М. Г. Веселов, Л. Н. Лабзовский. Теория атома: Строение электронных оболочек, М.: Наука, 1986; Б. М. Смирнов. Физика атома и иона. М.: Энергоатомиздат, 1986*).

Атомы с незаполненными электронными оболочками обладают *валентностью*, т. е. способностью образовывать связи. Например, валентность атома водорода равна единице, так как в его оболочке находится лишь один электрон. В химической связи атомов участвуют только непарные электроны, спины которых не компенсируют друг друга. Валентность атомов определяется числом таких неспаренных электронов, находящихся в незаполненных состояниях.

5.2. ДИАГРАММЫ ГРОТРИАНА

В 1924 году немецкий физик Вальтер Гротриан (*W. R. W. Grotrian, 1890–1954*) предложил чрезвычайно полезные и наглядные диаграммы состояний атомов, которые широко используются в современной атомной спектроскопии. Он впервые расположил ось энергии вертикально вверх по ассоциации с изменением энергии в поле силы тяжести, а горизонтальную ось отвел для классификации состояний по орбитальным и спиновым квантовым числам. Он писал (*УФН, 5(3), с. 186, 1925*): «...уровни энергии атомов, между которыми происходят квантовые скачки, могут быть расположены в отдельные ряды, которые мы назовем энергетическими лестницами. Однако расстояния между ступенями каждой такой лестницы не равны друг другу, как в обыкновенной лестнице, а все больше и больше убывают по мере подъема вверх».

При этом в случае мультиплетных спектров «каждая ступень распадается на несколько близких ступеней».

В 1928 году вышла в свет книга Гротриана «Графическое представление спектров атомов и ионов с одним, двумя и тремя валентными электронами», в которой была собрана в виде диаграмм информация о состояниях и спектрах 23 атомов и 48 ионов различной кратности. На рисунке 5.1 представлена диаграмма Гротриана для атома натрия, которая впервые была приведена в этой книге.

Числа с левой стороны определяют потенциалы возбуждения различных состояний атома, а также его потенциал ионизации. По числам с правой стороны можно определить длины волн излучения, связанного с переходами между соответствующими уровнями энергии. Ряд символов по горизонтали изображает возможные состояния атома. Чтобы оценить достоинства такой диаграммы, достаточно взглянуть на схему термов натрия, которой пользовался в свое время Нильс Бор (рис. 5.2).

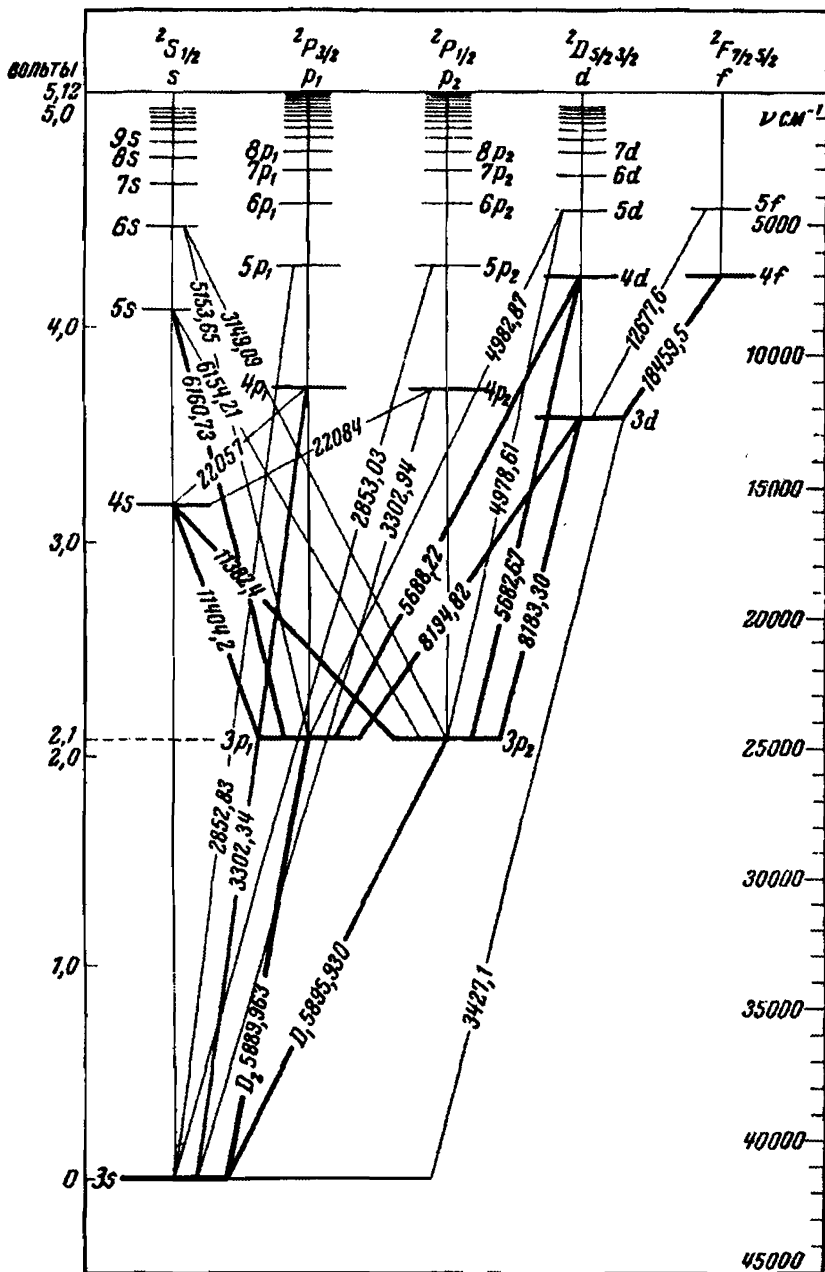


Рис. 5.1

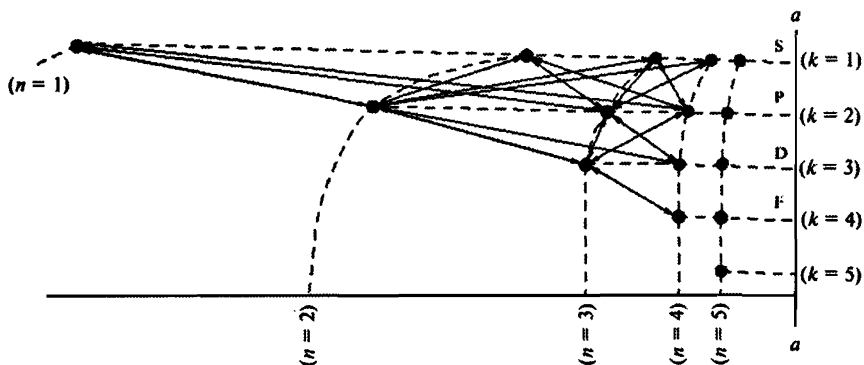


Рис. 5.2

В настоящее время диаграммы Гротриана, несущие в себе важную информацию об атомной системе, разработаны практически для всех химических элементов и их ионов (С. Г. Раутиан, А. С. Яценко. УФН, 169(2), с. 217, 1999).

5.3. ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ АТОМЕ ВОДОРОДА

От Демокрита до Дальтона атом представлялся в виде абсолютно твердой мельчайшей неделимой частицы, при этом считалось, что атом сохраняет свою индивидуальность в любых соединениях с другими атомами. Для объяснения химических реакций этого было вполне достаточно.

Великие открытия XIX века привели к пониманию того, что «неделимый» атом имеет структуру, в которую как неотъемлемая часть входят электроны и как-то распределенный положительный заряд. На основании опытных данных Резерфорд пришел к выводу, что положительный заряд атома сосредоточен в ничтожной части его объема, который он назвал ядром, и что атом имеет планетарное строение. Однако по Резерфорду нельзя было рассчитать размер атома и объяснить сам факт существования такого атома. Это удалось сделать Бору с помощью квантовых постулатов. Согласно Бору электрон в атоме водорода может двигаться по квантованным круговым орбитам и минимальный радиус орбиты — боровский радиус

$a_1 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,53 \text{ \AA}$ — определяет размер атома в нормальном состоянии.

В возбужденных состояниях с главным квантовым числом n электрон находится на орбитах с радиусами $r_n = n^2 a_1$. Это значит, что в возбужденных состояниях атом «разбухает».

Однако по представлениям квантовой механики никаких орбит электронов в атоме не существует. Можно лишь говорить о вероятном нахождении электрона в некотором стационарном состоянии в некоторой области внутри атома. Стационарные состояния атома определяются с помощью уравнения Шредингера. Решение его для атома водорода показывает, что дискретные значения энергии описываются такой же формулой, как и

в теории Бора — $E_n = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$. Этот же результат следует из квантовой

механики в матричной форме. Таким образом, совершенно разные теории, основанные на принципиально различных физических предположениях, приводят к совпадающим результатам, которые согласуются с экспериментальными данными. Это еще раз показывает, что согласие теории, например, теории Бора, с экспериментом еще не означает, что данная теория полностью корректна. По этому поводу уместно вспомнить слова Эйнштейна: *«Опыт никогда не скажет теории „да“, но говорит в лучшем случае „может быть“, большей же частью — просто „нет“. Когда опыт согласуется с теорией, для нее это означает „может быть“; когда же он противоречит ей, объявляется приговор: „нет“».*

Если не рассматривать спиновые эффекты, то вероятное местонахождение электрона в состоянии, определяемом квантовыми числами n, ℓ, m , задается волновыми функциями $\psi_{n\ell m}(r, \varphi, \vartheta) = R_{n\ell}(r)Y_{\ell m}(\varphi, \vartheta)$. Здесь r — расстояние электрона от центра атома, φ, ϑ — углы в сферической системе координат, $Y_{\ell m}(\varphi, \vartheta) = P_{\ell}^{|m|}(\cos \vartheta) \exp(im\varphi)$ — шаровые функции, $P_{\ell}^{|m|}(\cos \vartheta)$ — присоединенные полиномы Лежандра, $R_{n\ell}(r)$ — радиальная волновая функция. Вероятность того, что электрон находится в элементе объема $dV = r^2 \sin \vartheta dr d\varphi d\vartheta \equiv r^2 dr d\Omega$, где $d\Omega$ — элемент телесного угла, определяется квадратом модуля волновой функции:

$$dW_{n\ell m} = |\psi_{n\ell m}|^2 r^2 dr d\Omega = R_{n\ell}^2(r) r^2 dr \left(P_{\ell}^{|m|}(\cos \vartheta) \right)^2 d\Omega.$$

Эта формула определяет распределение электронного заряда в атоме. Видно, что распределения по углам и по радиусу являются независимыми, так что их можно рассматривать отдельно, при этом распределение электронного заряда не зависит от азимутального угла. Вероятность того, что электрон находится на расстоянии от r до $r + dr$ от ядра, равна $dW_{n\ell}(r) = R_{n\ell}^2(r) r^2 dr \equiv D_{n\ell}(r) dr$. Вероятность того, что электрон находится в элементе телесного угла $d\Omega$, определяется формулой $dW_{\ell m}(\vartheta) = \left(P_{\ell}^{|m|}(\cos \vartheta) \right)^2 d\Omega$.

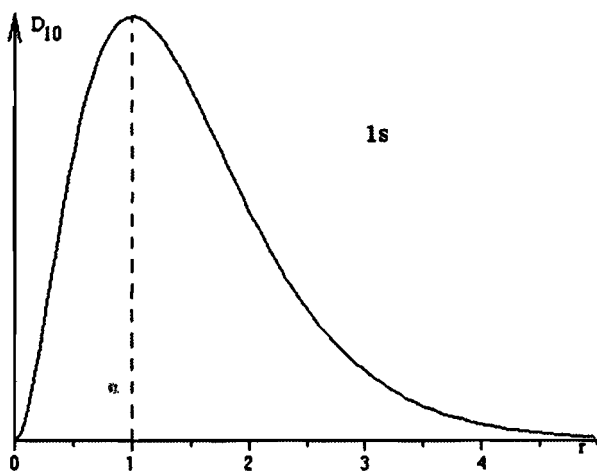


Рис. 5.3

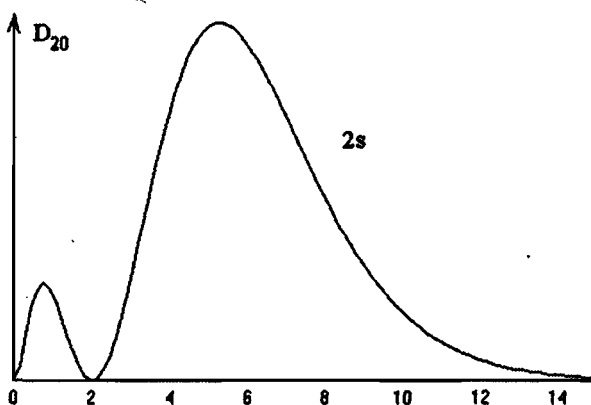


Рис. 5.4

Распределение электронного заряда в атоме зависит от того, в каком состоянии находится атом. Например, плотность вероятности $D_{10}(r)$ нахождения электрона в основном состоянии $1s$ на некотором расстоянии от ядра изображена на рисунке 5.3. Здесь на оси абсцисс отложено расстояние в единицах радиуса первой боровской орбиты. В отличие от боровских представлений оказывается, что электрон не находится точно на расстоянии, равном радиусу первой боровской окружности, но вероятность на этом расстоянии максимальна. В этом случае говорят, что имеется «размытое» соответствие с боровской теорией. В первом возбужденном со-

стоянии $2s$ вероятное распределение электрона по радиусу имеет более сложный характер (рис. 5.4) и никакого соответствия с боровской теорией нет.

В общем случае всегда наблюдается «размытое» соответствие с боровскими орбитами для состояний с максимальными значениями орбитального квантового числа при данных значениях главного квантового числа, т. е. в состояниях $1s, 2p, 3d, 4f, \dots$. В этих состояниях распределение электронов по радиусу является «одногорбым» с максимумами на расстояниях, которые соответствуют боровским орбитам — $a_1, 4a_1, 9a_1, 16a_1, \dots$. В других же состояниях кривые распределения электронов по радиусу являются довольно сложными и имеют много «горбов».

Если говорить о вероятном распределении электронного заряда по углам на заданном расстоянии, т. е. о вероятном нахождении электрона на поверхности сферы заданного радиуса, то оказывается, что в основном состоянии электрон можно с равной вероятностью найти в любой точке на поверхности этой сферы. В других состояниях такая вероятность зависит не только от орбитального квантового числа ℓ , но также от магнитного орбитального квантового числа m .

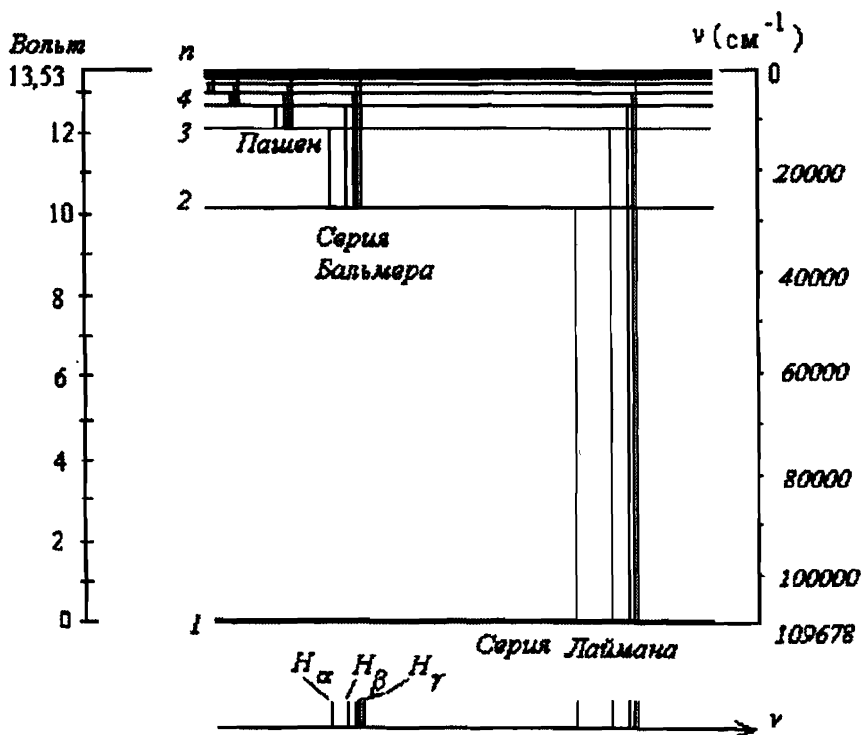


Рис. 5.5

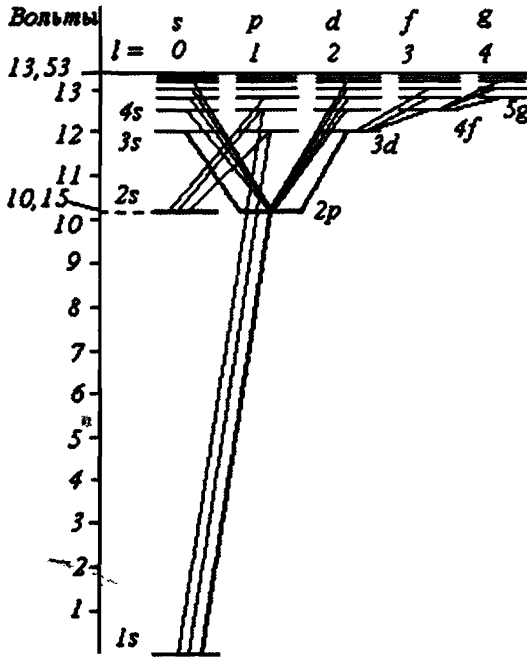


Рис. 5.6

При изучении теории Бора обычно изображают уровни энергии на диаграмме, с помощью которой легко объясняется возникновение спектральных серий атома водорода (рис. 5.5). Однако такая диаграмма не учитывает того, что электрон в атоме водорода может находиться в разных квантовых состояниях — $1s$, $2s, 2p$, $3s, 3p, 3d$, $4s, 4p, 4d, 4f$ и т. д. Тогда диаграмма уровней энергии несколько усложняется (рис. 5.6). Все состояния с одинаковым значением главного квантового числа имеют одинаковое значение энергии: электрон имеет одно и то же значение энергии в состояниях $2s, 2p$, также в состояниях $3s, 3p, 3d$ и т. д. Когда одному и тому же значению энергии отвечают разные волновые функции, т. е. разные состояния, то говорят, что такие состояния являются *вырожденными*. Все состояния атома водорода, кроме основного состояния, являются вырожденными. Число разных волновых функций, отвечающих одному и тому же значению энергии, называют *кратностью вырождения* состояний (или уровней энергии). Кратность вырождения уровней энергии атома водорода равна n^2 . С учетом спина электрона кратность вырождения удваивается.

Состояния $2s$ и $2p$ характеризуются одним и тем же значением энергии, но они отличаются друг от друга: переход из состояния $2p$ в основное

состояние $1s$ возможен, тогда как переход из состояния $2s$ запрещен правилами отбора по орбитальному квантовому числу. Это означает, что состояние $2s$ является долгоживущим, метастабильным.

Однако и диаграмма на рис. 5.6 не является полной. Она не учитывает спина электрона. С его учетом каждый уровень энергии (кроме s -уровней) расщепляется на два подуровня (рис. 5.7): все p -уровни расщепляются на два подуровня ${}^2p_{1/2}$ и ${}^2p_{3/2}$; все d -уровни — на ${}^2d_{3/2}$ и ${}^2d_{5/2}$, и т. д. Нижние индексы определяют значения квантового числа полного момента импульса (*внутреннее квантовое число*), а верхний индекс «2» отмечает, что эти состояния являются дублетами. Такое расщепление называют *тонкой структурой термов*. Название «тонкая структура» связано с тем, что

это расщепление, определяемое *постоянной тонкой структуры* $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = 7,297 \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{137}$, мало по сравнению с расстоянием между соседними уровнями энергии (с разными значениями числа n). Однако эффекты тонкой структуры отчетливо регистрируются в эксперименте при изучении спектров атомов.

Тонкая структура термов атома была частично объяснена еще в рамках «старой квантовой теории» с учетом релятивистских эффектов (А. Зоммерфельд, 1916). Однако последовательное объяснение дублетной структуры термов дала релятивистская квантовая теория Дирака в 1928 году. На рис. 5.7 схематично изображены нижние состояния атома водорода в соответствии с этой теорией. Из диаграммы видно, что первая линия серии Бальмера —

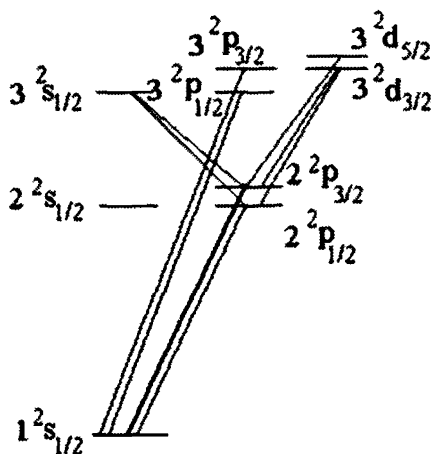


Рис. 5.7

линия H_α имеет сложную структуру. Она состоит из 5 компонентов. Структура этой линии тщательно изучалась на опыте. При этом получались противоречивые результаты.

В 1947 году американские физики Виллис Лэмб (*W. E. Lamb, Jr.*, 1913) и Ризерфорд (*R. C. Retherford*) выполнили решающий эксперимент (*Phys. Rev.* **72**, p. 241, 1947). Они показали, что в отличие от выводов теории Дирака состояния $2^2s_{1/2}$ и $2^2p_{1/2}$ отвечают разным значениям энергии (рис. 5.8). Смещение уровня $2^2s_{1/2}$ относительно уровня $2^2p_{1/2}$ называют *лэмбовским сдвигом*. Разности между подуровнями $2^2p_{3/2}$ и $2^2p_{1/2}$ соответствует частота около 11 ГГц (энергия — около $4,5 \cdot 10^{-5}$ эВ, длина волны — 2,74 см). Такие частоты находятся в диапазоне радиоволн. Лэмбовский сдвиг соответствует частоте 1 ГГц (волновое число равно $0,0359 \text{ см}^{-1}$). Точные измерения в этом диапазоне стали возможными в результате развития к концу 40-х годов XX века методов *радиоспектроскопии*.

Лэмб и Ризерфорд воспользовались тем, что уровень $2^2s_{1/2}$ с энергией 10,2 эВ является метастабильным (время жизни — 0,122 с). Действительно, прямой переход с этого уровня в основное состояние запрещен правилом отбора $\Delta l = \pm 1$. Другой возможный переход на уровень $2^2p_{1/2}$ имеет ничтожную вероятность, так как в дипольном приближении вероятность пропорциональна кубу частоты перехода, а в данном случае частота перехода мала. Возбужденное состояние $2^2p_{1/2}$ является короткоживущим: за время $1,6 \cdot 10^{-9}$ с из него совершается переход в основное состояние с излучением света с длиной волны $\lambda = 1216 \text{ \AA}$. Так же быстро происходит переход из состояния $2^2p_{3/2}$.

В своих опытах Лэмб и Ризерфорд использовали атомы водорода, находящиеся в метастабильном состоянии. Воздействуя на эти атомы радио-

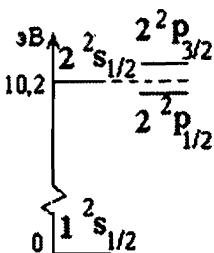


Рис. 5.8

частотным полем с частотой 1 ГГц , они вызывали их индуцированный переход в нижнее p -состояние. При воздействии полем с частотой 10 ГГц происходило поглощение излучения, и атомы переходили в верхнее p -состояние. Так был открыт лэмбовский сдвиг. (Подробнее см. Дж. Тригг. Физика XX века. Ключевые эксперименты. М.: Мир, 1978). За открытие сдвига уровней энергии атома водорода Лэмб был удостоен Нобелевской премии в 1955 году.

Принципиальное значение опыта Лэмба—Ризерфорда состоит в том, что он доказал ограниченность теории Дирака. В то время она считалась самой последовательной теорией, поскольку она была релятивистской и автоматически учитывала спин электрона. Поиски объяснения лэмбовского сдвига привели к пересмотру основ квантовой теории и возникновению квантовой электродинамики. Оказалось, что вакуум, в котором находятся электроны и ядро атома, нельзя рассматривать как пустоту, которая ничего не содержит. Напротив, вакуум обладает определенными физическими свойствами. В частности, существуют нулевые колебания вакуума. Эти колебания вызывают «дрожание» электрона в атоме, так что его потенциальная энергия изменяется. Это и приводит к лэмбовскому сдвигу. В настоящее время считают, что существует вакуум различной физической природы: фотонный вакуум, электронно-позитронный вакуум, мезонный вакуум и т. д. (О нулевых колебаниях см.: Ф. Я. Халили, УФН, 173(3), с. 301, 2003).

Астрономические наблюдения последних лет показали, что во Вселенной присутствует космический вакуум, плотность энергии которого превышает плотность всех других форм космической энергии вместе взятых. Это открытие влечет за собой как коренной пересмотр устоявшихся представлений о современном состоянии Вселенной, так и постановку новых принципиальных фундаментальных проблем в физике (А. Д. Чернин, УФН, 171(11), с. 1153, 2001). Космический вакуум проявляется в экспериментах не только в лэмбовском сдвиге спектральных линий атомов, но и в так называемом эффекте Казимира.

Величина лэмбовского сдвига пропорциональна Z^4 , поэтому он становится довольно большим для водородоподобных ионов. Современные измерения обнаруживают лэмбовский сдвиг не только уровня с главным квантовым числом $n = 2$, но также уровней с числом $n = 1$ и 3. Такие измерения выполнены для водорода и дейтерия и водородоподобных атомов от He^+ вплоть до Ar^{17+} . Проведены также измерения лэмбовского сдвига уровней тяжелых атомов, например, U^{90+} (H. Gould et al., 1986). Современные экспериментальные методы позволяют выполнять прецизионные измерения лэмбовского сдвига и других параметров атомных состояний (Ю. Л. Соколов, УФН, 169(5), с. 559, 1999).

В настоящее время длины волн различных переходов в атоме водорода от микроволн (при переходах между соседними уровнями с большими

значениями главного квантового числа) до ультрафиолета измеряются с очень высокой точностью — порядка 10^{-11} . Поэтому предлагается использовать атом водорода в качестве инструмента для метрологических стандартов длин волн [P. Cognac et al. Reports on Progr. Phys. 57(9), p. 853, 1994]. Отметим, что в одном только видимом диапазоне спектра атома водорода наблюдается более 50 спектральных линий.

Современные исследования водорода приводят к удивительным открытиям. Так в 1991 году был обнаружен новый тяжелый изотоп водорода ^5H . Группой российских физиков совместно с учеными из Японии, Франции, Великобритании и Швеции в 2003 году в лаборатории RIKEN (Япония) был зарегистрирован самый тяжелый изотоп водорода ^7H , в состав ядра которого входят 6 нейтронов и 1 протон (Phys. Rev. Lett. 90, p. 082501, 2003). Эти изотопы очень нестабильны, однако современными методами экспериментальной физики они вполне могут быть детектированы. Отметим также, что в 1996 году в Ливерморской лаборатории (США) был получен металлический водород H_2 , а в 2000 году металлический тяжелый водород D_2 (Phys. Rev. Lett. 84, p. 5564, 2000). Это было достигнуто при давлении 50 ГПа и температуре 8000 К с помощью мощного лазерного нагрева рабочей среды, которая толкала поршень, создавая в жидком дейтерии ударную волну. Предполагают, что примерно такие условия существуют в недрах планеты Юпитер. В той же лаборатории впервые получен металлический кислород (Phys. Rev. Lett. 86, p. 3108, 2001). Интересен эксперимент, выполненный недавно в Лейденском университете (Jan van Ruitenbeek et al., Nature, 419, p. 803, 2002), в котором было измерено электрическое сопротивление отдельной молекулы водорода, помещенной между двумя платиновыми электродами.

Как атом водорода является «простейшим» из атомов, так и молекула водорода H_2 является «простейшей» из молекул. Теорию молекулы водорода на основе уравнения Шредингера разработали в 1927 году Гайтлер и Лондон. Этим они положили начало *квантовой химии*.

Молекула водорода содержит два протона и два электрона. Возникает вопрос: каким образом из двух атомов водорода образуется молекула водорода? Представьте себе два достаточно удаленных друг от друга атома водорода, находящихся в основном состоянии $1s$. В этом случае их волновые функции (и электронные облака) не перекрываются друг с другом (рис. 5.9 а). При сближении атомов их волновые функции перекрываются, и уже надо рассматривать систему, содержащую два электрона и два ядра. Если считать ядра неподвижными, то свойства системы определяются только электронами. В системе двух электронов полный спин равен либо нулю (синглетное состояние), либо единице (триплетное состояние). Оказывается, в синглетном состоянии электронное облако сосредоточено в области между

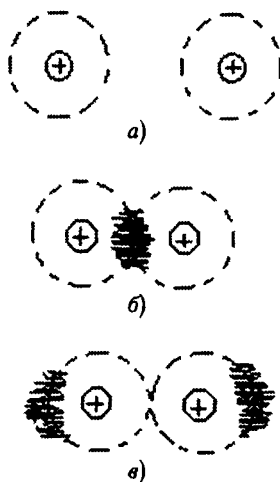


Рис. 5.9

ядрами (рис. 5.9 б). Отрицательный заряд этого облака компенсирует силу кулоновского отталкивания ядер. Так образуется стабильная система — молекула водорода. В триплетном состоянии при сближении атомов электронный заряд распределяется по разные стороны от ядер (рис. 5.9 в). В этом случае молекула образоваться не может.

5.4. МНОГОЭЛЕКТРОННЫЕ АТОМЫ

Уравнение Шредингера для водородоподобных атомов, как показывается во всех учебниках по квантовой механике, решается точно. Это позволяет определить все необходимые характеристики таких атомов. Задача с двумя электронами — атом гелия — решается уже с помощью специальных приближенных методов. Еще большие трудности возникают при рассмотрении многоэлектронных атомов. В этом случае нахождение точного решения уравнения Шредингера совершенно нереально. Поэтому разрабатываются различные приближенные методы вычисления волновых функций и энергии стационарных состояний атомов. Одним из таких методов является *метод самосогласованного поля* (метод Хартри—Фока). Идея этого метода, предложенного английским физиком Дулласом Хартри (*D. Hartree*, 1897–1958) в 1928 году, состоит в том, что каждый электрон в атоме считается находящимся в «самосогласованном поле». Такое поле, по предположению, создается ядром вместе со всеми остальными электронами. В 1930 году российский физик В. А. Фок обобщил метод Хартри, учтя тождественность электронов. С помощью этого метода было рассчитано с



Ферми

достаточно хорошей точностью большое число термов атомов и ионов. Однако по мере перехода к более тяжелым атомам вычисления по методу Хартри—Фока сильно усложняются из-за роста числа соответствующих уравнений. Для таких атомов успешно применяется другой приближенный метод, предложенный независимо американскими физиками Левелином Томасом (*L. Thomas*, 1903) в 1927 году и Энрико Ферми в 1928 году. Этот метод называют статистической моделью атома.

Энрико Ферми был выдающимся физиком. Его работы относятся к атомной и ядерной физике, статистической механике, физике космических лучей, физике высоких энергий, астрофизике. В 1925 году он независимо от Дирака разработал статистику частиц с полуцелым спином (статистику Ферми—Дирака). В 1933–1934 годах Ферми создал количественную теорию бета-распада, которая положила начало теории слабых взаимодействий. В 1934 году он открыл явление искусственной радиоактивности, вызванной нейтронами, обнаружил эффект замедления нейтронов и дал его теорию. За эти фундаментальные работы Ферми был удостоен Нобелевской премии в 1938 году. Он заложил основы нейтронной физики. В 1941 году он впервые зарегистрировал нейтроны, испускаемые при спонтанном делении. Ферми построил первый ядерный реактор, в декабре 1942 года осуществил самоподдерживающуюся цепную реакцию. В 1949 году он предложил механизм ускорения космических лучей, в 1950 году разработал статистическую теорию множественного образования мезонов.

В основе модели Томаса—Ферми лежит предположение, что электронный заряд непрерывно распределен в атоме, т. е. как бы размазан по объему атома с некоторой плотностью. Такое допущение оправдывается тем, что в тяжелых атомах большинство электронов находится в состояниях с большими значениями главного квантового числа и, следовательно, эти состояния могут рассматриваться в квазиклассическом приближении. Тогда распределение электронов в пространстве можно описывать, как и в классической физике, с помощью плотности заряда. Непрерывной плотности электронного заряда соответствует непрерывный потенциал. В квазиклассическом приближении плотность электронного заряда выражается через потенциал. Тогда уравнение Пуассона дает возможность найти распределение потенциала в атоме, а затем и распределение радиальной электронной плотности. Расчеты показали, что модель Томаса—Ферми правильно описывает среднюю область атома, где плотность электронов относительно высока, в периферийной области эта модель приводит к завышенным результатам (подробнее см. П. Гомбаш. Проблема многих частиц в квантовой механике. М.: ИЛ, 1952).

Квантово-механический расчет многоэлектронных атомов, а также молекул представляет собой очень сложную математическую задачу и попытки получить точное решение совершенно безнадежны. Это подчеркивал Дирак еще в 1929 году: «...*фундаментальные законы, необходимые для математического описания значительной части физики и всей химии, полностью известны, и проблема заключается только в том, что применение этих законов приводит к уравнениям, слишком сложным, чтобы их можно было решить*». Однако последнее время с помощью различных квантово-химических моделей разрабатываются достаточно эффективные методы, которые позволяют рассчитывать сложные многочастичные системы.

За развитие таких методов Джон Поппл (*John A. Pople*) и В. Кон (*W. Kohn*) в 1998 году были удостоены Нобелевской премии по химии (УФН, 172(3), с. 336–348, с. 349–356, 2002).

5.5. ЭКЗОТИЧЕСКИЕ АТОМЫ

Помимо водородоподобных атомов, т. е. ионов, существуют, как говорят, экзотические водородоподобные атомы — *позитроний, мюоний, мюонный атом, адронные атомы*. К экзотическим атомам относят также антиводород — атом, состоящий из антипротона и позитрона — $\bar{p}e^+$, и др.

Это своеобразные атомы без электронов и атомы без ядер. Такие атомы недолговечны, либо из-за малости времени жизни частиц — «заменителей», либо из-за взаимной аннигиляции частиц и их античастиц. Однако, несмотря на очень малое время существования, экзотические атомы оказались чрезвычайно эффективным инструментом в ядерной физике,

физике твердого тела, поскольку судьба этих атомов (время жизни, характер превращений) зависит от свойств окружающего их вещества.

Впервые понятие экзотического атома ввели Энрико Ферми, Эдвард Теллер (*E. Teller*, 1908) и Джон Уилер (*J. A. Wheeler*, 1911) в 1947 году для объяснения эксперимента (*M. Conversi et al.* *Phys. Rev.* **71**, p. 209, 1947), в котором было обнаружено, что в веществах, состоящих из тяжелых атомов ($Z \gg 1$, $A \gg 1$), время жизни отрицательных мюонов μ^- намного меньше, чем у свободных мюонов. Ферми, Теллер и Уилер показали, что отрицательные мюоны тормозятся в веществе и, «выталкивая» электрон из атома, образуют возбужденные мюонные атомы. Вначале мюон с массой $m_\mu = 207m_e$ (или любая другая отрицательная частица) находится на расстоянии порядка боровского радиуса в состояниях, которые характеризуются большими квантовыми числами $n \approx \sqrt{m_\mu/m_e} \approx 15$. Затем в результате каскадных процессов мюон «перескакивает» в ближайшие к ядру состояния с $n \approx 1$, при этом испускается жесткое рентгеновское излучение.

Торможение и каскадный процесс происходят за время $\tau_c \approx 10^{-12}$ с, тогда как время жизни мюона равно $\tau_\mu \approx 10^{-6}$ с. Этим и объясняется результат указанного выше эксперимента. Существование мюонного атома экспериментально было доказано в 1953 году (*V. L. Fitch, J. Rainwater.* *Phys. Rev.* **92**, p. 789, 1953). Лаймановская серия мюонного атома расположена в рентгеновской области. Радиус первой боровской орбиты мюона равен $r_1 = \hbar^2 / 4\pi^2 Ze^2 m_\mu = Z^{-1} 0,0026 \cdot 10^{-8}$ см. Это почти в 200 раз меньше, чем для обычного водородоподобного атома. При больших Z ($Z > 10$) боровская орбита мюона оказывается внутри ядра атома. Это обстоятельство используется для изучения структуры атомного ядра.

Позитроний (*Ps*) (*M. Deutsch, E. Dulit,* *Phys. Rev.* **84**, p. 601, 1951) представляет собой связанную систему, в которой содержатся электрон и позитрон, обращающиеся вокруг общего центра масс. Позитрон e^+ является античастицей по отношению к электрону. Атом позитрония образуется при прохождении позитронов через газ и последующем захвате позитроном атомного электрона. Эта система нестабильна. Она существует довольно короткое время, поскольку электрон и позитрон аннигилируют, и позитроний распадается на два (за время $\approx 10^{-10}$ с) или на три (за время $\approx 10^{-7}$ с) фотона. При этом по закону сохранения энергии суммарная энергия фотонов равна $2m_e c^2$. Хотя время жизни атома позитрония мало, однако оно оказывается вполне достаточным для изучения его свойств. Так как массы электрона и позитрона одинаковы, то приведенная масса $\mu = m_e/2$. Поэто-

му энергия ионизации позитрония равна $E_{\text{ион}} = \frac{hc}{2} R_H^\infty = \frac{13,6}{2} \text{эВ} = 6,8 \text{эВ}$.

Это хорошо согласуется с результатами измерений.

Помимо аннигиляции частиц, составляющих позитроний, возможна еще, как говорят, фрагментация позитрония на свободные электрон и позитрон при неупругом рассеянии на атомах вещества, в частности, на атомах гелия (*Physics News Update*, Number 609). В качестве источника позитронов были использованы радиоактивные распады изотопа ^{22}Na . Позитроний возникал в реакции обмена зарядом при пролете пучка позитронов через газообразный водород: $e^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ps} + \text{H}_2^+$.

Мюонием называют атом, который состоит из положительного мюона и электрона — $\mu^+ e^-$. Мюоний, как и мюонный атом, существует малое время, которое определяется временем жизни мюона (около 2,2 мкс).

Адронный атом представляет собой систему, в которой атомный электрон замещен отрицательным адроном. Адронами называют элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях — это протон и антипротон, π – мезоны, K — мезоны и др. Например, адронный атом, содержащий протон и антипротон, имеет радиус боровской орбиты, который в 918 раз меньше радиуса атома водорода. Это связано с тем, что приведенная масса такого атома в 918 раз больше массы атома водорода. Соответственно, возрастает потенциал ионизации.

В ЦЕРНЕ и в лаборатории им. Ферми было получено небольшое количество атомов *антиводорода*, состоящих из антипротонов и позитронов. Недавно было получено уже около 50 000 атомов антиводорода. Получение атомов антиводорода в достаточном количестве имеет важное значение для фундаментальных исследований, в частности, для проверки, так называемой *CPT*-теоремы. При нарушении этой теоремы интервалы между энергетическими уровнями атомов водорода и антиводорода должны быть различными (<http://physicsweb.org>).

Последнее время исследуются адронные атомы вида $\pi^+ \pi^-$. По расчетам (*М. А. Иванов, В. Е. Любовицкий и др.* Дубна, 1998) время жизни таких атомов ничтожно мало — порядка $(3,03 \pm 0,10) \cdot 10^{-15} \text{с}$.

Подробнее об экзотических атомах см. *Л. И. Меньшиков, М. К. Есеев.* УФН, 171(2), с. 149, 2001.

Интересным экзотическим объектом является также *антипротонный гелий*. Это атом гелия, в котором один из электронов замещен антипротоном. Такие атомы получаются при пропускании пучка ускоренных антипротонов через гелиевую среду. Существование антипротонного гелия теоретически предсказал Г. Кондо (*G. Kondo*) в 1964 году, а экспериментально он был обнаружен в 1991 году. Для этого атома характерна необычная

структура энергетических уровней. Из-за взаимодействия магнитных моментов антипротона и электрона возникает тонкое и сверхтонкое расщепление уровней. Все тонкости расщепления энергетических уровней антипротонного гелия, рассчитанные теоретически, с высокой точностью подтверждены экспериментом (*E. Widmann et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, p. 243402, 2002).

5.6. ВОЗБУЖДЕННЫЕ АТОМЫ

В естественных условиях без внешнего воздействия атом находится в своем основном состоянии, в котором он может пребывать бесконечно долго. Помимо основного состояния существуют различные возбужденные состояния, в которые можно перевести атом, сообщив ему необходимую энергию. В этих состояниях атом может находиться лишь в течение определенного промежутка времени, называемого *временем жизни атома* в данном возбужденном состоянии. Нижние возбужденные состояния атомов условно делятся на *резонансно-возбужденные* и *метастабильные* состояния. Эти состояния резко различаются друг от друга по так называемому *излучательному времени жизни*: если в резонансно-возбужденных состояниях атом может находиться в течение $10^{-7} - 10^{-9}$ с, то в метастабильных состояниях время жизни по атомным масштабам может быть чудовищно велико — от 0,01 до $8 \cdot 10^3$ с! Существование метастабильных возбужденных состояний связано с тем, что переход из этих состояний с испусканием фотона оказывается запрещенным правилами отбора. В таком случае может происходить *двухфотонный спонтанный распад*, т. е. спонтанное испускание атомом двух фотонов. Однако вероятность таких процессов намного меньше вероятности однофотонного распада.

Современные эксперименты показывают, что вероятность спонтанных переходов зависит от того, находится ли атом в свободном пространстве (вакууме), или в некотором резонаторе, или в плазме. Если резонатор настроен на частоту перехода возбужденного атома, то скорость спонтанного излучения, определяемая в этом случае добротностью резонатора, увеличивается по сравнению с вакуумным значением. Если же резонатор расстроен, то скорость спонтанного излучения уменьшается, так как атом в этом случае не может излучить фотон. Тогда говорят, что происходит *подавление спонтанной эмиссии*. Это значит, что атом может существовать в возбужденном состоянии достаточно длительное время (*Г. Вальтер*. УФН, 166(7), с. 777, 1996). Высоковозбужденные состояния атома называются *ридберговскими состояниями*. Они характеризуются тем, что один из электронов внешней оболочки атома имеет большие значения главного квантового числа. Поэтому он слабо связан с остальными электронами и ядром атома. В этом смысле высоковозбужденный (ридберговский) атом аналогичен ато-

мам щелочных металлов. При больших значениях главного квантового числа частота перехода на соседний уровень становится равной классической частоте обращения электрона. Таким образом, ридберговский атом можно рассматривать как диполь, колеблющийся с резонансной частотой, при этом дипольный момент очень велик, так как радиус атома пропорционален n^2 .

На свойствах ридберговских атомов основаны современные высокочувствительные приборы, которые существенно расширяют рамки измерительных возможностей.

Одним из приборов такого типа является, например, детектор инфракрасного излучения. Он позволяет по переходам между состояниями $23P$ и $22D$ атома натрия под действием теплового излучения измерить интенсивность этого излучения. В настоящее время достигаются высоковозбужденные состояния атомов со значениями главного квантового числа $n \approx 60-70$. Это, в частности, дало возможность реализовать одноатомный лазер, или микролазер. Так называют устройство, в котором единичный атом, находящийся в ридберговском состоянии, взаимодействует с отдельной модой резонатора. В таком микролазере были использованы ридберговские атомы рубидия, находящиеся в состоянии $63^2P_{3/2}$. Рассматривались два лазерных перехода на уровни $61^2D_{3/2}$, $61^2D_{5/2}$. Скорость инжекции атомов в резонатор выбиралась такой, чтобы в резонаторе в среднем находилось менее одного атома. Тогда при пролете через резонатор отдельные атомы поддерживают в нем непрерывные колебания. Амплитуда этих колебаний определяется средним числом фотонов от единиц до нескольких сотен. Созданы также микролазеры в оптическом диапазоне. Возможно, что они произведут переворот в вычислительной технике, оптической связи и т. д.

5.7. СТАБИЛИЗАЦИЯ АТОМОВ

Во внешнем электрическом поле происходит расщепление уровней энергии атома и его спектральных линий. Это впервые обнаружил немецкий физик Иоганн Штарк (*J. Stark*, 1874–1957) в 1913 году. Открытое им явление называют *эффектом Штарка*.

Из решения уравнения Шредингера следует, что в постоянном электрическом поле с напряженностью F уровень энергии с главным квантовым числом n расщепляется на $2n - 1$ подуровней. Это значит, что основной уровень не расщепляется. Первый возбужденный уровень расщепляется на три подуровня (рис. 5.10). Расщепление уровней энергии приводит к тому, что головная линия лаймановской серии расщепляется на три компоненты, головная линия бальмеровской серии расщепляется на 15 компонент и т. д.

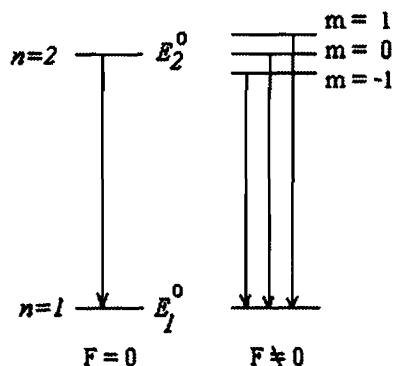


Рис. 5.10

Расстояние между двумя крайними подуровнями определяется с помощью формулы $\Delta E = 3n(n-1)a_1 eF$. Оценки показывают, что для уровня $n = 2$ в электростатическом поле с напряженностью $F = 10^4$ В/см величина расщепления $\Delta E \approx 3 \cdot 10^{-4}$ эВ, тогда как разность между уровнями энергии равна $E_2^0 - E_1^0 \approx 10$ эВ.

Увеличение расщепления с возрастанием главного квантового числа можно объяснить тем, что в этом случае электрон удаляется от ядра. Тогда возрастает электрический дипольный момент атома. Общая картина расщепления спектральных линий атома в электрическом поле оказывается довольно сложной.

В достаточно сильном электрическом поле может произойти ионизация атома. Чем больше величина напряженности электрического поля, тем больше вероятность процесса ионизации. Когда напряженность электрического поля F сравнивается с величиной напряженности атомного поля $F_a \approx 10^9$ В/см, то процесс ионизации происходит за характерное атомное время $\tau_a \approx \hbar^3 / m_e e^4 \approx 10^{-16}$ с. Современная лазерная техника позволяет получать напряженности электрического поля излучения, превышающие атомную напряженность: $F \geq 10^{10}$ В/см (при интенсивности сфокусированного излучения $I \geq 10^{18}$ Вт/см²). Казалось бы, что в *сверхатомных полях* $F > F_a$ атом не может существовать в связанном состоянии, так как за время τ_a он должен превратиться в ион (или ядро) и свободный электрон. Однако это не так. Дело в том, что электрон может поглотить фотон и оторваться от атома, если только он находится в связанном состоянии в атоме. Поглощение же фотона свободным электроном невозможно, так как невозможно одновременно удовлетворить законам сохранения энергии и им-

пульса в системе электрон-фотон. Таким образом, для поглощения электрон должен быть связанным. Но с увеличением напряженности внешнего поля связь электрона с ядром ослабляется, и при $F \gg F_a$ электрон является практически свободным, т. е. в этом случае поглощение фотонов становится невозможным. Таким образом, вероятность ионизации атома возрастает с увеличением напряженности внешнего электрического поля, пока $F < F_a$, и уменьшается — при $F > F_a$, т. е. максимум вероятности фотоионизации соответствует напряженности электрического поля $F \approx F_a$. Приведенные рассуждения показывают, что в сверхатомном поле возникает *эффект стабилизации атома* по отношению к процессу ионизации (Н. Б. Делоне, В. П. Крайнов. УФН, 165(11), с. 1295, 1995; М. В. Федоров. УФН, 169, с. 66, 1999).

5.8. «ОХЛАЖДЕННЫЕ» АТОМЫ

При комнатной температуре атомы и молекулы воздуха совершают хаотическое движение с огромной скоростью — около 4000 км/час (1 км/час = 25 см/с). В таких условиях нечего и говорить об исследовании отдельных атомов. Скорость теплового движения атомов можно значительно уменьшить, если понизить температуру. Но с понижением температуры газ обычно переходит в жидкое состояние и при дальнейшем охлаждении — в твердое. А в этих состояниях исследование отдельных атомов становится еще более трудным. Если же газ является сильно разреженным, когда его концентрация на много порядков меньше числа Лошмидта, то можно избежать конденсации, и при понижении температуры сильно замедлить атомы. Но даже при температуре — 270°С скорость хаотического движения остается большой — около 400 км/час, и лишь вблизи абсолютного нуля тепловая скорость атомов значительно уменьшается. Например, при температуре 10^{-6} К свободные атомы водорода движутся со скоростью около 1 км/час. Как же добиться такого *глубокого охлаждения атомов*? Исследования в этом направлении ведутся с использованием лазерного излучения.

Первые эксперименты по лазерному охлаждению атомов проводились в Москве Летоховым в 1981 году. Результаты экспериментов изложены в книге — В. Летохов, В. Миногин. Давление лазерного излучения на атомы. М.: Наука, 1986. Несколько позднее работа в этом направлении началась в лабораториях США, Франции и др.

При поглощении или испускании фотона с импульсом $\hbar k$ атом испытывает отдачу, скорость которой равна $v_R = \hbar k / m_a$, где $k = 2\pi / \lambda$ — волновое число излучения, m_a — масса атома. Эта скорость мала. Например, характерная скорость отдачи при оптических переходах в атомах щелоч-

ных металлов имеет величину около (1–3) см/с . Малой является также энергия отдачи атома $E_R = \hbar^2 k^2 / 2m_a$, с которой связывают температуру, называемую *пределом отдачи* T_R . Эта температура определяется согласно соотношению $k_B T_R / 2 = E_R$, где k_B — постоянная Больцмана. Для атома натрия предел отдачи равен $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}$, а для атома цезия — около $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}$.

Проведенные исследования показали возможность глубокого охлаждения атомов до температур, меньших T_R , и удержания (пленения) их в ограниченном объеме (В. Летохов, Стивен Чу — *S. Chu*, Клод Коэн-Тануджи — *C. Cohen-Tannoudji*, Уильям Филипс — *W. D. Phillips* и др.).

Оказалось, что лазерное излучение является своего рода «вязкой жидкостью», которую называют *оптической патокой*. В этой патоке атомы сильно замедляются, и возникает возможность с большой точностью исследовать отдельные атомы и их структуру. По мере накопления атомов в ловушке образуется газ, который также может быть изучен. Существуют различные устройства — ловушки для удержания атомов и различные методы их охлаждения (*V. Balykin, V. Minogin, V. Letokhov*. *Rep. Progr. Phys.* **63**, p. 1429–1510, 2000). Комбинированием различных методов охлаждения и удержания атомов в современных экспериментах достигнуты температуры и плотности: для атомов цезия — $T \approx 10^{-6} \text{ K}$, $n \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$; для атомов водорода — $T \approx 10^{-4} \text{ K}$, $n \approx 8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ (*C. Monroe et al.* *Phys. Rev. Lett.* **65**, p. 1571, 1990; *J. M. Doyle et al.* *Phys. Rev. Lett.* **67**, p. 603, 1991). В группе К. Коэн-Тануджи удалось охладить атомы гелия до температуры $0,18 \cdot 10^{-6} \text{ K}$, при которой скорость атомов составляла 2 см/с . В их установке лазерные лучи образовывали стоячие волны, электрические поля которых подобны «гребенке». Когда атом проходил сквозь нее, всплески электрического поля вызывали переход атома во все более низкое энергетическое состояние, что приводило его к охлаждению. Такой метод, получивший название «сизифова охлаждения», подобен тому, как атом как бы движется в гору, против поля, и теряет энергию.

За развитие методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света группе физиков (*S. Chu; W. D. Phillips; C. Cohen-Tannoudji*) в 1997 году была присуждена Нобелевская премия. (Подробнее см. УФН, **169**(3), с. 271, 1999).

Охлажденные атомы применяются для создания сверхточных эталонов времени, в измерениях очень малых изменений силы тяжести, в создании атомных лазеров и т. д.

Одной из главных целей охлаждения атомов и их удержания является Бозе—Эйнштейновская конденсация слабо взаимодействующего газа. На возможность этого явления указал Эйнштейн еще в 1925 году (*A. Эйнштейн*, Собрание научных трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965, с. 489). Конденса-

ция Бозе—Эйнштейна состоит в том, что при $T \rightarrow 0$ все бозе-частицы стремятся находиться в состоянии с минимальной энергией. Для осуществления такой конденсации необходимо, чтобы тепловая длина волны де Бройля $\lambda_{dB} = h / \sqrt{2\pi m k_B T}$ превосходила среднее расстояние между частицами. Точнее, необходимо, чтобы в сфере с радиусом, равным λ_{dB} , находилось не менее определенного числа частиц: $\frac{4\pi}{3} n \lambda_{dB}^3 > \frac{4\pi}{3} \cdot 2,612$. С

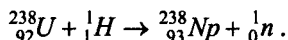
помощью глубокого охлаждения паров атомов рубидия-87, которые были ограничены магнитными полями, был получен бозе-конденсат при температуре $1,7 \cdot 10^{-7} \text{ K}$, плотности атомов $2,5 \cdot 19^{12} \text{ см}^{-3}$, существовавший в течение 15 секунд (*M. H. Anderson et al. Science, 269, p. 198, 1995*).

В 2001 году «за получение конденсата Бозе—Эйнштейна в разреженных газах щелочных металлов и ранние фундаментальные исследования свойств этих конденсатов» была присуждена Нобелевская премия (*Goss Levi, Phys. Today, 54 (12), p. 14, 2001*).

5.9. ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Самым тяжелым из элементов, существующих в природе, является уран — ${}_{92}^{238}\text{U}$. Элементы периодической системы, следующие за ураном, возможно, когда-то существовали на Земле, но затем все они претерпели радиоактивный распад и теперь они могут быть воссозданы лишь искусственным путем. Чтобы получить из одного элемента другой (*мечта алхимиков!*), нужно проникнуть в центр его атома и изменить заряд ядра. Впервые это удалось осуществить в 1919 году Резерфорду, который с помощью α -частиц превратил азот в кислород. Ядерные реакции могут происходить также при слиянии ядра исходного элемента с протоном — ядром атома водорода ${}^1_1\text{H}$. Однако осуществить такой процесс на практике не так просто. Дело в том, что протон и ядро имеют одинаковый по знаку заряд, поэтому при их сближении возникают колоссальные силы кулоновского отталкивания. Для преодоления этих сил налетающий на ядро протон должен обладать большой кинетической энергией. Такие протоны, мчащиеся со скоростью порядка 30 тысяч км/с, создаются с помощью мощной техники — ускорителей заряженных частиц. Однако попадание протона в мишень из исходного элемента еще не гарантирует, что в результате появится новый элемент, поскольку вероятность попадания протона в ядро атома мишени очень мала. Кроме того, часто вместо слияния протона с ядром исходного атома, происходит другой процесс — протон разбивает это ядро. Если протон, преодолев силы отталкивания, «коснулся» поверхности ядра, то на него начинают действовать мощные ядерные силы и образует-

ся *составное ядро*, в которое протон принес дополнительную энергию. Такое ядро похоже на готовый взорваться сосуд с закипевшей жидкостью. Из-за неустойчивости ядро освобождается от избытка энергии, делясь на два ядра — *осколки деления*. В этом случае новый элемент не получается. Однако ядро может избавиться от избытка энергии и другим путем — выбрасывая из себя кванты электромагнитного излучения, протоны или нейтроны. Например, при попадании ускоренных протонов на уран-238 составное ядро может передать избыток энергии нейтрону с образованием ядра нептуния:



К сожалению, такие реакции происходят довольно редко — в одном случае на сотни и даже миллионы попаданий протонов в ядра атомов мишени. Этим объясняется очень малое количество образующихся новых трансурановых элементов.

Синтез первых трансурановых элементов — нептуния (93) и плутония (94) осуществили американские физики Эдвин Макмиллан (*E. McMillan*, 1907–1991) и Гленн Сиборг (*G. Seaborg*, 1912–1999) в 1940–1941 годах. За это они были удостоены Нобелевской премии в 1951 году. Начиная с Менделевия (элемент № 101) новые элементы синтезируются буквально в количестве нескольких атомов. Но это еще не главное препятствие на пути установления факта рождения нового элемента и оценки его свойств. Дело в том, что новые элементы являются, как правило, короткоживущими с очень малым периодом полураспада. Например, изотопы элементов с номерами 102, 103, 104 имеют период полураспада, измеряемый секундами и долями секунды, а период полураспада элемента 106 равен тысячным долям секунды. И все же физики за это время сумели доказать, что это те самые элементы, которые соответствуют своему месту в периодической системе!

Современные модели атомного ядра предсказывают, что особо устойчивыми должны быть ядра, у которых число протонов или нейтронов равно «магическому числу»: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Считается, что «сверхэлементом» должно быть ядро с дважды «магическими числами» — со 126 протонами и 184 нейтронами.

Большую работу в получении новых элементов, заслуженно оцененную научным сообществом, проводят физики в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Они вскрыли ряд ошибок в зарубежных работах, связанных с открытием элемента 102, и первыми синтезировали элемент 104. Элементу с номером 105 присвоено имя *дубний* в знак заслуг ученых Дубны. В настоящее время считаются обнадеживающими попытки синтеза 114 и 116 элементов. В 1999 году появились первые сообщения о том, что в Дубне синтезирован 114-ый элемент с массовым числом 298, живущий около 30 секунд (*Nature(London)*, 397, p. 289, 1999;

Phys. World, 12(2), p. 7, 1999; 12(3), p. 19, 1999). Ядро такого атома содержит 114 протонов и 184 нейтронов. Исследования этого элемента продолжаются (Ю. Ц. Оганесян, Вестник РАН, 71, с. 590, 2001).

Приведем названия трансурановых элементов: 100 — **Fm** (*Фермий*), 101 — **Md** (*Менделевий*), 102 — **No** (*Нобелий*, в честь учредителя Нобелевской премии Альфреда Бернхарда Нобеля, 1833–1896), 103 — **Lr** (*Лоуренсий*, в честь американского физика Эрнесто Лоуренса), 104 — **Rf** (*Резерфордий*), 105 — **Db** (*Дубний*), 106 — **Sg** (*Сиборгий*, в честь Сиборга), 107 — **Bh** (*Борий*, в честь Нильса Бора), 108 — **Hs** (*Гассий*, в честь земли Гессен в Германии, где расположен Дармштадтский ускоритель заряженных частиц DESY), 109 — **Mt** (*Мейтнерий*, в честь австрийского физика Лизе Майтнер). Общепринятые названия других элементов еще не установлены.

Возникает естественный вопрос — конечно ли число элементов в природе, или, как считал Демокрит, их бесчисленное множество? По этому поводу существуют различные мнения. Однако вспомним, что согласно теории Бора скорость электрона на n -ой орбите определяется выражением

$$v_n = \frac{Z}{n} \alpha c$$
, где величина $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры. По-

скольку скорость электрона не может превышать скорость света, то на основании этой формулы можно предположить, что в природе возможно существование конечного числа элементов — до $Z = \alpha^{-1} = 137$.

Среди различных названий XX века одним из распространенных является «*атомный век*». Этим подчеркивается, что в XX веке ученые не только раскрыли многие тайны мироздания, но и сумели овладеть атомной энергией. Сначала, к сожалению, это была атомная бомба и другие военные применения, например, атомные подводные лодки, а затем научились использовать энергию атома в мирных целях — это атомные электростанции, атомные ледоколы, радиоизотопные генераторы для космических целей, стимуляторы сердечной деятельности и т. д. Однако, строго говоря, атомная энергия — это вовсе не энергия атомов, а энергия их ядер. «*Атомная энергия*» выделяется при делении тяжелых ядер, при этом на каждое делящееся ядро освобождается энергия около 200 МэВ. Эта величина почти в миллиарды раз превосходит энергию, выделяющуюся в единичном акте химических реакций, которая даже в самом лучшем случае составляет несколько эВ. Для получения атомной (ядерной) энергии используют ядерные реакторы, для работы которых необходимо ядерное топливо (ядерное горючее). В природе имеется только одно ядерное топливо — уран. Существуют три стабильных изотопа урана ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U . Самым распространенным является ^{238}U , которого содержится около 99,3 % в естественном уране. Основную роль в ядерной энергетике играют ядра изотопов урана ^{235}U , ^{233}U и плутония ^{239}Pu .

Помимо реакций деления тяжелых ядер, в которых выделяется колоссальная энергия, существуют также реакции синтеза (слияния) ядер легких элементов. В реакциях синтеза в расчете на единицу массы реагирующих веществ выделяется еще большая энергия. Реакция синтеза осуществлена в еще более разрушительной, чем атомная, водородной бомбе. Более полувека ученые разных стран бьются над *проблемой управляемого термоядерного синтеза*, которая неразрывно связана с физикой высокотемпературной плазмы.

5.10. МАЗЕРЫ И ЛАЗЕРЫ

Мазеры и лазеры являются генераторами когерентного электромагнитного излучения в различных диапазонах. Основная идея возможности создания таких генераторов фактически содержится в представлениях Эйнштейна о спонтанных и вынужденных переходах между различными состояниями атомов (1916 год). Однако воплощение этой идеи затянулось на долгие годы. В 1939–1940 годах российский физик В. А. Фабрикант (1907–1991) предсказал возможность усиления света в плазме за счет вынужденного испускания. В 1951 году он совместно с М. М. Вудынским и Ф. А. Бугаевой сформулировал общий принцип усиления электромагнитного излучения. Ими было установлено, что электромагнитные волны усиливаются при прохождении через среду, в которой концентрация частиц или их систем на верхних энергетических уровнях избыточна по сравнению с их концентрацией в равновесном состоянии. Это была идея квантового усилителя.

Чтобы понять эту идею, надо подробнее рассмотреть процесс распространения электромагнитного излучения через вещество. Допустим, что электромагнитное излучение частоты ω с плотностью потока энергии I_ω падает на слой вещества толщиной dx . При прохождении этого слоя поток ослабляется вследствие поглощения атомами вещества. Уменьшение плотности потока энергии $-dI_\omega$ пропорционально плотности потока падающего излучения и толщине слоя: $-dI_\omega = k_\omega I_\omega dx$. Коэффициент пропорциональности k_ω называют коэффициентом поглощения. Отсюда следует, что плотность потока излучения на расстоянии x от плоскости падения изменяется по закону Бугера (*P. Bougier*, 1698–1758): $I_\omega(x) = I_\omega(0) \exp(-k_\omega x)$.

Поглощение излучения носит резонансный характер: излучение более всего поглощается на частоте, совпадающей с частотой перехода между двумя уровнями энергии атомов вещества. Это значит, что коэффициент поглощения имеет острый максимум на частоте перехода между уровнями энергии E_1 и E_2 , причем $E_2 > E_1$. Если концентрация частиц на этих уровнях

нях равна, соответственно, N_1 и N_2 , то коэффициент поглощения определяется формулой

$$k_{\omega} = \frac{\hbar\omega}{u} N_1 B_{12} g(\omega) (1 - N_2 B_{21} / N_1 B_{12}).$$

Здесь B_{12} и B_{21} — коэффициенты Эйнштейна, связанные соотношением $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$, при этом g_1 (или g_2) — кратность вырождения уровня E_1 (или E_2). Величина u означает скорость распространения излучения в данной среде, $g(\omega)$ характеризует «размазанность» уровней энергии.

В обычных условиях число атомов на верхних энергетических уровнях гораздо меньше их числа на нижних уровнях, т. е. $N_2 \ll N_1$. Действительно, при термодинамическом равновесии отношение числа атомов на этих уровнях равно $N_2 / N_1 = \exp\{-(E_2 - E_1) / kT\} = \exp(-\hbar\omega / kT)$. Например, для видимого излучения (частота $\nu = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$) при нормальной температуре $T = 300 \text{ K}$ отношение $\hbar\omega / kT = 1,2 \cdot 10^3$. Следовательно, $N_2 \ll N_1$. Этим и объясняется известный факт, что в обычных условиях излучение, проходя через вещество, ослабляется, поскольку в этом случае коэффициент поглощения $k_{\omega} > 0$.

Возникает вопрос: может ли излучение при прохождении через среду не ослабляться, а напротив того — усиливаться? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к формуле для коэффициента поглощения. Из нее следует, что если концентрация атомов с большей энергией N_2 превышает N_1 , то коэффициент поглощения k_{ω} становится отрицательным, т. е. происходит, как говорят, отрицательное поглощение. Это и означает, что излучение не ослабляется, а усиливается. Таким образом, для того, чтобы среда усиливала падающее на нее излучение, необходимо обеспечить инверсную, т. е. обращенную, населенность энергетических уровней. Под *населенностью энергетических уровней* понимают величину N_m / g_m . Неравенство $N_2 / g_2 > N_1 / g_1$ является *основным условием индуцированного усиления*. Среда, в которой осуществлена инверсная населенность энергетических уровней, называется *активной средой*. Важной особенностью активной среды является не только то, что она усиливает проходящее через нее электромагнитное излучение, но при этом происходит сужение спектра излучения.

Написанное основное условие является необходимым для усиления электромагнитного излучения активной средой. Однако оно вовсе недостаточно. Дело в том, что в активной среде излучение не только усиливается, но также и ослабляется. Ослабление излучения происходит, например,

из-за поглощения, из-за рассеяния на неоднородностях среды, из-за выхода из ее объема и т. п. Если коэффициент усиления превосходит суммарный коэффициент потерь, то активная среда становится усилителем для проходящего через нее электромагнитного излучения. Чтобы среда стала генератором излучения, необходимо использовать положительную обратную связь. В этом случае часть усиленного излучения возвращается в активную среду и снова усиливается и т. д. Если усиление, достигаемое с помощью такой связи, превышает суммарные потери усилителя и цепи обратной связи, то усилитель самовозбуждается и превращается в генератор. Для создания положительной обратной связи в радиочастотном диапазоне используют объемные резонаторы, а в оптическом диапазоне — системы зеркал, которые называют открытыми резонаторами.

Общие принципы индуцированного усиления и генерации электромагнитного излучения осуществлены в современных квантовых устройствах, называемых мазерами и лазерами. **Мазер** — это квантовый усилитель волн микроволнового диапазона. Его название — *MASER* образовано из начальных букв фразы «*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» — усиление микроволн с помощью стимулированной эмиссии излучения. **Лазер** — это квантовый генератор в оптическом диапазоне. Его название — *LASER* также образовано из начальных букв аналогичной фразы, в которой слово *Microwave* заменено на слово *Light* — свет.

Первым был создан мазер на молекулах аммиака в 1954–1955 гг. независимо и почти одновременно российскими физиками Н. Г. Басовым (1922–2001) и А. М. Прохоровым (1916–2002) и группой американских физиков во главе с Чарльзом Таунсом (C. Townes, 1915). Всем им в 1964 году была присуждена Нобелевская премия. Так был отмечен их выдающийся вклад в становление и развитие новой области современной физики — квантовой электроники.

Работа квантового генератора любого типа требует выполнения двух резонансных условий:

- 1) Классическое условие: резонанс волна-резонатор. На длине резонатора должно укладываться целое число полуволн генерируемого излучения. Если L — длина резонатора, λ — длина волны излучения, то должно быть $s\lambda/2 = L$, где s — целое число.
- 2) Квантовое условие: резонанс волна—атом. Энергия каждого фотона генерируемого излучения должна быть равна энергии перехода между двумя рабочими уровнями активной среды.

В настоящее время разработаны самые разнообразные типы лазеров. Особое значение среди них имеют лазеры с перестраиваемой частотой. Они перекрывают очень широкую область — от инфракрасного диапазона с длинами волн $(2-3) \cdot 10^{-3}$ см до вакуумного ультрафиолета с длинами волн $(1-2) \cdot 10^{-4}$ см. С помощью таких лазеров существенно расширились воз-

возможности исследования свойств атомов и молекул. Они позволяют детектировать даже отдельные атомы. Настройкой частоты лазерного луча можно попасть в резонанс с частотой перехода между уровнями энергии выбранных атомов. Мощности излучения лазера в доли ватта достаточно, чтобы такие атомы поглотили квант света и спонтанно испустили фотон в произвольном направлении. Весь этот процесс для одного атома длится сотые доли микросекунды. Если атом движется с тепловой скоростью — это несколько сот метров в секунду, то он пересекает лазерный луч диаметром в 1 см за несколько десятков микросекунд. Таким образом, за время пересечения лазерного луча атом около тысячи раз успевает поглотить и испустить фотоны. Другими словами, атом как бы светится в лазерном луче. Испущенные атомами фотоны являются характерными именно для выбранных атомов, даже если они находятся в смеси с атомами другого сорта. Эти фотоны можно собрать, направить их на фотоумножитель и затем регистрировать с помощью электронной аппаратуры. Это один из методов обнаружения одиночных атомов (рис. 5.11). Более точный и универсальный метод обнаружения атомов основан на явлении избирательной фотоионизации. В этом случае используется излучение не одного, а двух или трех лазеров. Первый лазер как бы «метит» атом. Для этого он настраивается в резонанс с возбуждением первого уровня выделяемого атома. Второй лазер необходим для фотоионизации «меченого» атома из первого возбужденного состояния. Тем самым этот атом как бы «вынимается» из газа. Если при облучении вторым лазером ионизации атома не происходит, а только достигаются его высоковозбужденные состояния, то необходим третий лазер. В результате атом превращается в ион, который легко регистрируется обычными средствами электроники. Таким образом, например, удалось обнаружить присутствие одного атома цезия в объеме, где находились 10^{19} атомов газа (Харст, Нейфи, Янг, 1977). Такой фантастической чувствительностью обладают современные физические приборы. Они используются в полупроводниковой электронике и других областях современной техники, где требуется точная оценка примесей, присутствующих в веществе; при контроле состояния окружающей среды и т. д. Особо важным этот метод является в ядерной физике, где в ходе ядерных реакций на ускорителях или других условиях исследуется малое число образовавшихся новых атомов. Созданный с помощью лазера атомный «наноскоп» позволяет изучать отдельные атомы (A. Steane, Nature, 414, p. 24, 2001). Таким образом, теперь оказывается возможным непосредственно видеть то, что в течение двух с половиной тысячелетий считалось принципиально недоступным не только для наблюдения, но и познания! Помимо упомянутых лазерных методов детектирования атомов существуют также методы исследования атомных структур с использованием таких установок, как электронный микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп и т. п. Как пример, на рисунке 5.12 показан снимок атомов золота, сделанный с помощью электронного микроскопа.

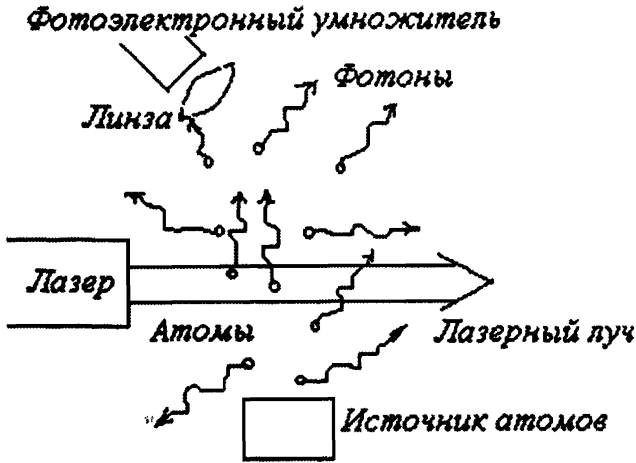


Рис. 5.11

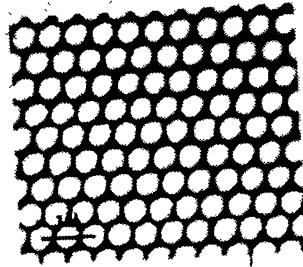


Рис. 5.12

Последние годы отмечены колоссальными достижениями в области лазерных технологий (M. Perry, G. Mourou, Science, 264, p. 917–924 (may 13, 1994)). В лаборатории Лоуренса в Ливерморе (США) был создан лазер с рекордной пиковой мощностью 10^{15} Вт. Сверхмощные лазеры создаются также и в других лабораториях. При фокусировке излучения достигаются плотности потока энергии от 10^{18} до 10^{23} Вт/см². Энергия такого излучения сосредоточена в очень коротких импульсах длительностью около нескольких пико-, фемто- и даже атто-секунд ($1 \text{ а} = 10^{-18}$ с). Ожидается, что будут вскоре достигнуты фантастические интенсивности на уровне 10^{26} – 10^{28} Вт/см² (G. A. Mourou, C. P. J. Barty, M. D. Perry, Phys. Today, 51 (1), p. 22, 1998; H. Kapteyn, M. Murnane, Phys. World, 12(1), p. 33, 1999). При этом создаются лазеры не только в оптическом диапазоне, но также в рентгеновском — **разеры** и гамма-диапазоне — **гразеры**.

При огромной мощности лазерного излучения может происходить рождение пары электрон-позитрон. Оценку необходимой для этого мощности можно провести по Швингеру (*J. Schwinger*, *Phys. Rev.* 82, p. 664, 1951). Рождающиеся частицы должны иметь энергию порядка m_0c^2 в течение их времени жизни порядка $\tau \approx \hbar/m_0c^2$. Соответствующая характерная длина $c\tau$ представляет собой комптоновскую длину $\lambda_c = \hbar/m_0c$. На этой длине поле излучения должно сообщить частицам необходимую энергию. Таким образом, *швингеровское поле* $E_s = m_0c^2/e\lambda_c$ имеет порядок $E_s \approx 2 \cdot 10^{16}$ В/см. Этому полю отвечает интенсивность около $I_s = 10^{30}$ Вт/см². При интенсивностях излучения, намного меньших указанного значения, вероятность рождения пары может считаться малой.

Расчеты показывают, что в поле мощного лазерного излучения возможно ускорение заряженных частиц до колоссальных энергий порядка Тера эВ и Пета эВ. Так что, возможно, в недалеком будущем в ядерной физике вместо дорогостоящих традиционных ускорителей заряженных частиц, имеющих огромные размеры — это целые фабрики, будут использоваться компактные мобильные лазерные ускорители., с помощью которых можно будет осуществлять ядерные реакции. Уже сейчас имеются эксперименты, которые демонстрируют расщепление ядер атомов в поле мощного лазера, включая деление урана (рис. 5.13) (*R. W. D. Ledingham et al.* *Phys. Rev Lett.* 84, p. 899, 2000; *T. E. Cowan et al.* *Phys. Rev Lett.* 84, p. 903, 2000). Мощные лазеры предполагают использовать и для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. В этом направлении существует даже специальная программа — лазерный синтез (*О. Н. Крохин*, УФН, 172(12), с. 1466, 2002). Недавние успешные эксперименты (*S. Fritzler et al.* *Phys. Rev. Lett.* 89, p. 165004, 2002) вселяют надежду, что эта программа вполне может быть реализована.

Квантовые генераторы электромагнитного излучения создаются учеными в физических лабораториях. Однако оказалось, что лазеры существуют и в природе, в частности, в межзвездном пространстве. Существование лазеров в межзвездном пространстве связано с тем, что в этом пространстве имеются атомы и даже сложные молекулы. Первая межзвездная молекула была открыта в 1937 году. Это был свободный химический радикал *СН*. Однако самым распространенным является водород. Это было доказано в 1951 году, когда было зарегистрировано излучение с длиной волны 21 см, соответствующее переходу между двумя очень близкими состояниями атома водорода. В 1963 году радиоастрономы обнаружили в межзвездной среде гидроксил — *ОН*. Затем были открыты более сложные молекулы, в частности, молекулы аммиака и водяные пары. Исследования показали, что излучение гидроксила происходит из областей, в которых температура выше, чем в межзвездной среде. При этом чаще всего в



Рис. 5.13

радиоспектре этих областей гидроксил давал не линию поглощения, а довольно узкую интенсивную линию излучения. Это означало, что молекулы *ОН* являются более «горячими», чем их окружение. В самом деле, излучение молекулы возможно лишь в том случае, если она находится в возбужденном состоянии. Но, испустив фотон, она теряет энергию, и чтобы вновь произошло излучение, каким-то образом молекула снова должна перейти в возбужденное состояние. Это и означает, что в таких областях «работает» гигантский мазер, в котором постоянно создается инверсная заселенность уровней энергии гидроксила. В тех же местах, откуда приходит мощное мазерное излучение гидроксила, наблюдаются также интенсивные линии излучения водяных паров. Так что работает также мазер на водяных парах. В областях работы мазеров концентрация частиц достигает 10^8 см^{-3} , а температура — от нескольких сотен до 1000 К. Условия для возникновения мазера существуют в так называемых протозвездах и в наружных областях некоторых очень холодных звезд (Д. Рэнк, Ч. Таунс, У. Уэлч, УФН, 112(2), 1974). Космические мазеры обнаружены более чем

на 100 молекулах (Ч. Х. Таунс, Квантовая электроника, **24**, с. 1063, 1997) и на возбужденных атомах водорода (V. Strelinski et al. Science, **272**, p. 1459, 1996). В атмосферах Марса и Венеры было отмечено стимулированное излучение молекулы CO_2 в инфракрасной области спектра (M. J. Mumma et al. Science, **212**, p. 45, 1981). Наряду с мазерным эффектом существует также космический лазерный эффект (В. С. Летохов, УФН, **172**(12), с. 1468, 2002).

5.11. ФУЛЛЕРЕНЫ

Хорошо известно, что в природе существуют две основные кристаллические модификации углерода в виде алмаза и графита. В 1985 году была открыта новая форма многоатомных молекул углерода — фуллерены. Авторы этого открытия (английский ученый Гарольд Крото — H. Kroto и американские ученые Роберт Керл — R. F. Curl и Ричард Смелли — B. M. Smalley) были удостоены Нобелевской премии по химии в 1996 году. Фуллеренами называются замкнутые молекулы типа C_{60} , C_{70} , C_{76} , C_{84} и т. д. В них все атомы углерода располагаются на сферической или сфероидальной поверхности. Наиболее стабильной является молекула C_{60} , которую называют бакминстерфуллереном (сокращенно — бакибол, или футболино). Такое название было дано в честь американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера (R. B. Fuller, 1895), который известен своими конструкциями ячеистых куполов из сборных деталей.

В этой молекуле 60 атомов углерода расположены на сферической поверхности (как на поверхности футбольного мяча) в вершинах 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников (рис. 5.14), так что

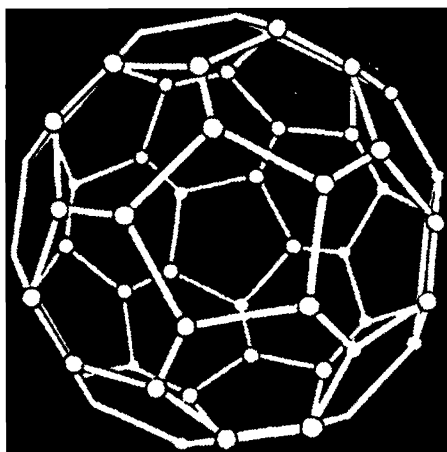


Рис. 5.14

каждый атом углерода находится в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника, и все они тождественны.

Атомы углерода в молекуле C_{70} находятся в вершинах 25 шестиугольников и 12 пятиугольников и т. д. Возможно существование высокосимметричных и устойчивых молекул C_{240} , C_{540} , C_{960} , которые, однако, пока не обнаружены. Считают также, что возможно экзотическое образование типа «матрешки» («*Russian egg*»): внутри молекулы C_{960} молекула C_{540} и т. д. Во всех фуллеренах обязательно содержится 12 пятиугольников. Это вытекает из теоремы Эйлера, согласно которой из правильных шестиугольников может быть образован замкнутый выпуклый многогранник, если только к ним добавить 12 правильных пятиугольников. По теореме Эйлера, у всякого выпуклого многогранника число вершин V , граней G и ребер P связаны соотношением $V + G - P = 2$. Для фуллерена, состоящего из n шестиугольников и m пятиугольников, $V = (6n + 5m)/3$, $G = n + m$, $P = (6n + 5m)/2$. Отсюда следует, что для фуллеренов число $m = 12$.

В настоящее время наиболее изучена молекула C_{60} . Ее диаметр — около 7 Å. Длина связи C=C, которая разделяет шестиугольники, равна 1,512 Å, длина связи C—C, общей для шести- и пятиугольников, равна 1,433 Å. Свободных связей у фуллерена нет, чем и объясняется его большая химическая устойчивость и механическая прочность. Валентные электроны фуллерена распределены почти равномерно по сферической оболочке толщиной около $8a_1$, где a_1 — боровский радиус. Центральная часть фуллерена является полостью с диаметром около $4a_1$. Молекулы C_{60} образуют кристалл с кубической гранцентрированной решеткой — фуллерит. В узлах решетки такого молекулярного кристалла находятся не отдельные атомы, а центры масс молекул. Элементарная ячейка фуллерита имеет размеры около 10 Å. Чистый фуллерит, состоящий из одних фуллеренов, является диэлектриком. Фуллерит образуется также из сферических углеродных молекул C_{70} как продукт объемной полимеризации при давлении свыше 90 тысяч атмосфер и температуре более 300° С.

Оказалось, что фуллерены имеются в свечном нагаре, газовой саже и, вообще, во всех продуктах неполного сгорания углерода. В настоящее время фуллерены получают при сжигании графита в струе гелия. При испарении графита возникают достаточно мелкие углеродные кластеры — небольшие группы атомов углерода, имеющие линейную структуру и множество свободных связей. В охлаждающей атмосфере гелия образуются чешуйки с оборванными по краям связями. Такая структура оказывается энергетически невыгодной, поэтому возникает стремление замкнуть концы свободных связей. Так образуется энергетически наиболее выгодная сферическая структура фуллерена — минимальный фуллерен, в котором пятиугольники не имеют общих ребер. Необходимость атмосферы инертного гелия

вызвана тем, что гелий не насыщает оборванных при испарении связей и тем самым позволяет углеродной чешуйке замыкаться самой на себя. Иначе симметрия сворачивающейся чешуйки нарушается. При определенных условиях образуются эллипсоидные молекулы (*бареллены*), трубчатые молекулы (*тубелены*), молекулы в виде тора и более сложные структуры молекул. В 1991 году при получении фуллеренов японские ученые обнаружили полые углеродные трубки диаметром около 3–30 нм. Эти образования они назвали *нанотрубками*, которые сейчас вызывают большой интерес своими необычными свойствами (*S. A. Chesnokov et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **82**, p. 343, 1999). Например, с помощью углеродной нанотрубки диаметром 75 нм, частично заполненной жидким галлием, был сконструирован микроскопический термометр, позволяющий измерять температуру от 323 до 823 К (*Y. Gao, Y. Bondo*, *Nature*, **415**, p. 599, 2002).

Фуллерены имеют широчайшую область применения. Это — основа для производства уникальных смазочных материалов; уже синтезирована молекула $C_{60}F_{60}$, представляющая собой самый маленький в мире «шарикоподшипник». Из молекул фуллерена получают материалы колоссальной прочности и твердости — фуллериты, которые царапают алмаз! На основе фуллерита в Научно-техническом центре «Сверхтвердые материалы» в г. Троицке создан новый прибор — «NanoScan», в котором игла для измерения твердости и зонд сделаны из ультратвердого фуллерита. Этот прибор позволил измерить с большой точностью твердость различных кристаллографических плоскостей алмаза.

Фуллерены используются в *нанoeлектронике*, составляют основу элементов суперкомпьютеров и устройств, способных считать отдельные электроны, разделять отдельные атомы по их размерам и т. д.

Хотя чистый фуллерит — диэлектрик, но *легированием*, т. е. добавлением определенных примесей, его можно превратить в проводник, обладающий свойством *высокотемпературной сверхпроводимости*. Было показано, например, что легированный калием фуллерит K_3C_{60} становится сверхпроводником при температуре 17 К, а после замены калия на рубидий температура сверхпроводящего перехода возрастает до 29 К и даже до 43 К. [Подробнее о фуллеренах см.: УФН, **161**(7), с. 173, 1991; УФН, **163**(2), с. 33, 1993; УФН, **166**(8), с. 893, 1996; УФН, **170**, с. 113, 2000.]

✦ ЛИТЕРАТУРА

1. Ансельм А. И. Очерки развития физической теории в первой трети XX века. М.: Наука, 1986.
2. Борн М. Размышления и воспоминания физика. М.: Наука, 1977.
3. Борн М. Физика в жизни моего поколения. М.: ИЛ, 1963.
4. Бройль Л. де По тропам науки. М.: ИЛ, 1962.
5. Вавилов С. И. Собр. соч., т. 3, М.: Наука, 1956, с. 715.
6. Вайскопф В. Ф. Физика в 20-ом столетии. М.: Атомиздат, 1977.
7. Гейзенберг В. Физика и философия. М.: ИЛ, 1965.
8. Гейзенберг В. Философские проблемы атомной физики. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.
9. Гинзбург В. Л. УФН. 169(4), с. 419, 1999; 172(2), с. 213, 2002.
10. Данин Д. С. Нильс Бор (серия ЖЗЛ). М.: Молодая гвардия, 1978.
11. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики. Ч. 1 и 2. М.: URSS, 2007–2009.
12. Ельяшевич М. А. УФН, 100, с. 5, 1970.
13. Зубов В. П. Развитие атомистических представлений до начала XXI века. М.: Наука, 1965.
14. Иоффе А. Ф. Встречи с физиками. М.: Физматгиз, 1962.
15. Капица П. Л. Письма о науке. М.: Моск. рабочий, 1989.
16. Льюис М. История физики. М.: Мир, 1970.
17. Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972.
18. Марков М. А. Размышляя о физике. М.: Наука, 1988.
19. Милантьев В. П. Атомная физика. М.: Изд. РУДН, 1999.
20. Паули В. Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1975.
21. Паули В. Физические очерки. М.: Наука, 1975.
22. Планк М. Единство физической картины мира. М.: Наука, 1966.
23. Полак Л. С. В сб. Очерки развития основных физических идей. М.: Наука, 1959, с. 323.
24. Пономарев Л. И. Под знаком кванта. М.: Наука, 1989.

25. Пуанкаре А. О науке. М.: Наука, 1983.
26. Сб.: 50 лет квантовой механики. М.: Наука, 1979.
27. Сб.: Теоретическая физика XX века. М.: ИЛ, 1962.
28. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике. М.: Мир, 1974.
29. Тригг Дж. Физика XX века. Ключевые эксперименты. М.: Мир, 1978.
30. Храмов Ю. А. Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983.
31. Шёпф Х., От Кирхгофа до Планка. М.: Мир, 1981.
32. Шредингер Э. Новые пути в физике. М.: Наука, 1971.
33. Эйнштейн А. Эволюция физики. М.: Устойчивый мир, 2001.
34. Эренфест П. Относительность, кванты, статистика. М.: Наука, 1972.
35. Энциклопедия для детей. Т. 16. Части 1, 2. М.: Аванта+, 2000.

✦ ПРИЛОЖЕНИЯ

П. 1. Э. РЕЗЕРФОРД

РАССЕЯНИЕ α - И β -ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВОМ И СТРУКТУРА АТОМА

Rutherford E.

Phil. Mag. 1911, Vol. 21, p. 669–688.

The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom

(Э. Резерфорд. Избранные труды. М.: Наука, 1972)

§ 1. Хорошо известно, что α - и β -частицы при встрече с атомами вещества испытывают отклонения от своих прямолинейных траекторий. Для β -частиц это рассеяние гораздо заметнее, чем для α -частиц, вследствие того, что импульс и энергия первых намного меньше, чем вторых. По-видимому, нет никакого сомнения в том, что столь быстро движущиеся частицы проходят сквозь находящиеся на их пути атомы и что наблюдаемые отклонения происходят под действием сильных электрических полей, пересекаемых частицами внутри атомных систем. Обычно предполагалось, что рассеяние пучка α - или β -лучей при прохождении сквозь тонкую пластинку вещества является результатом множества малых актов рассеяния, осуществляемых атомами пересекаемого вещества. Данные Гейгера и Марсдена (*Proc. Royal Soc.* 1909, v. 82, p. 495) по рассеянию α -лучей указывают, однако, на то, что некоторые из α -частиц при отдельных столкновениях испытывают отклонения на углы, превышающие прямой угол. Они, например, установили, что небольшая часть налетающих α -частиц, примерно одна частица из 20 000, отклоняется в среднем на 90° при прохождении сквозь слой золотой фольги толщиной около 0,00004 см, эквивалентный по своей тормозящей способности по отношению к α -частицам слою воздуха толщиной 1,6 мм. Позже Гейгер показал (*Proc. Roy. Soc.* 1910, v. 83, p. 492), что для пучка α -частиц, пронизывающих золотую фольгу данной толщины, наивероятнейшим углом отклонения является угол около $0,87^\circ$. Простое вычисление на основе теории вероятностей показывает, что вероятность отклонения α -частицы на 90° исчезающе мала. Кроме того, как будет показано ниже, распределение частиц по большим углам отклонения не подчиняется формуле распределения, выведенной в предположении, что эти большие отклонения образуются в результате сложения большого чис-

ла малых отклонений. Представляется разумным предположить, что отклонение на большой угол происходит в результате однократного столкновения с атомом, так как вероятность последующего столкновения такого типа, при котором получилось бы тоже большое отклонение в ту же сторону, в большинстве случаев должны быть чрезвычайно мала. Простой расчет показывает, что в атоме должно быть сосредоточено сильное электрическое поле для того, чтобы вызвать столь большое отклонение при однократном столкновении.

Сэр Дж. Дж. Томсон (Camb. Lit. and Phil. Soc. 1910, v. 15, pt. 5) недавно выдвинул теорию, объясняющую рассеяние частиц, проходящих через тонкие слои вещества. Предполагается, что атом состоит из N отрицательных заряженных частиц с таким же количеством положительного электричества, равномерно распределенным внутри некоторой сферы. Отклонение отрицательно заряженной частицы в процессе прохождения сквозь атом объясняется двумя причинами:

- 1) отталкиванием от частиц, распределенных в атоме, и
- 2) притяжением к положительному заряду атома.

Предполагается, что отклонение частицы при пронизывании атома мало, тогда как среднее отклонение после большого числа встреч m принимается равным $\sqrt{m}\theta$, где θ — среднее отклонение, вызванное одним атомом. Было показано, что число N электронов в атоме может быть вычислено из измерений по рассеянию заряженных частиц. Точность этой теории многократного отклонения была экспериментально проверена Кроузером (Crowther — Pros. Roy. Soc. 1910, v. 84, p. 226). Его результаты, по-видимому, подтверждали основные заключения теории Томсона, и, принимая непрерывность распределения положительного электричества, Кроузер сделал вывод, что число электронов в атоме превышает атомную массу примерно втрое.

Теория Томсона основана на предположении, согласно которому рассеяние при однократной встрече с атомом мало и строение, приписываемое атому, не допускает очень больших отклонений α -частицы, пересекающей отдельный атом, если только не принять, что диаметр сферы положительного электричества ничтожно мал по сравнению с диаметром сферы влияния атома...

§ 2. ...Рассмотрим атом, содержащий заряд $\pm Ne$, сосредоточенный в центре и окруженный наэлектризованной сферой с зарядом $\mp Ne$, равномерно распределенным внутри сферы радиуса R . Через e обозначим фундаментальную единицу заряда, которую в этой статье мы принимаем равной $4,65 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ $_q$. Предположим, что даже по сравнению с расстоянием, не превышающим 10^{-12} см, центральный заряд, равно как и заряд α -частицы, может рассматриваться как точечный. Ниже будет показано, что основные выводы теории не зависят от того, будем ли мы считать цен-

тральный заряд положительным или отрицательным. Для удобства будем считать его положительным. Вопрос об устойчивости предлагаемого атома не нуждается в рассмотрении на этом этапе, так как устойчивость, несомненно, зависит от тонкостей строения атома и от движения его заряженных составных частей.

Чтобы составить некоторое представление о силах, требующихся для отклонения α -частицы на большой угол, рассмотрим атом, содержащий положительный заряд Ne , расположенный в центре атома и окруженный отрицательным электрическим зарядом, распределенным равномерно внутри сферы радиусом R . Электрическая сила X и потенциал V на расстоянии r от центра атома до точки, расположенной внутри атома, равны

$$X = Ne\left(1/r^2 - r/R^3\right), \quad V = Ne\left(1/r - 3/2R + r^2/2R^3\right).$$

Представим себе α -частицу с массой m , со скоростью v , зарядом E , метящую прямо на центр атома. Она будет остановлена на расстоянии b центра атома, определяемом соотношением

$$mv^2/2 = NeE\left(1/b - 3/2R + b^2/2R^3\right).$$

Предполагая, что центральный заряд равен $100e$, получаем, что для α -частицы со скоростью $2,09 \cdot 10^9 \text{ см/с}$ расстояние b составляет около $3,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}$. Этот результат получается при допущении, что b очень мало по сравнению с R . Поскольку предполагается, что порядок величины R тот же, что и радиуса атома, а именно, 10^{-8} см , ясно, что до своего отскока назад α -частица проникает в глубь атома настолько близко к центральному заряду, что полем, обусловленным равномерно распределенным отрицательным электрическим зарядом, можно пренебречь. Вообще, простой расчет показывает, что для всех отклонений, превышающих один градус, можно с достаточной степенью точности приписывать все отклонение действию только поля центрального заряда...

Рассмотрим теперь прохождение положительно заряженной частицы вблизи центра атома. Предполагая, что скорость частицы не изменяется заметным образом при прохождении мимо атома, можно рассматривать траекторию частицы, движущуюся под действием силы отталкивания, обратно пропорциональной квадрату расстояния, как гиперболу с внешним фокусом в центре атома S . Положим, что частица входит в атом по направлению PO и выходит по OP' (рис. 1). Прямые OP и OP' образуют равные углы с линией SA , где A — вершина гиперболы. Отрезок $p = SN$ представляет собой длину перпендикуляра, опущенного из центра атома на направление начальной скорости частицы (прицельное расстояние). Обозначим угол POA через θ . Пусть V выражает скорость частицы при вхождении в атом, а v — ее скорость в точке A . Тогда из условия сохранения момента импульса $pV = Sav$. Условие сохранения энергии дает $mV^2/2 = mv^2/2 - NeE/SA$.

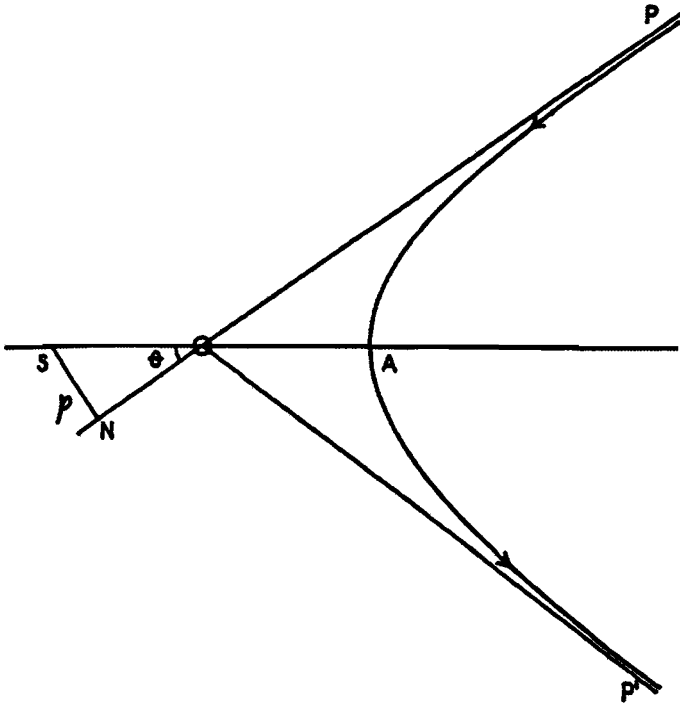


Рис. 1

$v^2 = V^2(1 - b/SA)$. Так как эксцентриситет равен $\sec \theta$, то имеем $SA = SO + OA = p \operatorname{cosec} \theta (1 + \cos \theta) = p \operatorname{ctg} \theta/2$,

$$p^2 = SA(SA - b) = pc \operatorname{tg}(\theta/2) [pc \operatorname{tg}(\theta/2) - b], \text{ откуда } b = 2p \operatorname{ctg} \theta.$$

Угол отклонения частицы равен $\phi = \pi - 2\theta$. Тогда

$$\operatorname{ctg}(\phi/2) = 2p/b \dots \quad (1)$$

§ 3. Вероятность однократного отклонения на любой угол.

Предположим, что параллельный пучок заряженных частиц падает нормально на тонкий экран из исследуемого вещества толщиной t . За исключением немногих частиц, рассеиваемых на большие углы, прохождения частиц предполагается почти нормальным, с малым изменением скорости. Обозначим через n число атомов в единице объема вещества. Тогда в слое толщиной t число столкновений частицы с атомами радиусом R будет равно $\pi R^2 nt$. Вероятность m вхождения в атом с прицельным расстоянием p составит $m = \pi p^2 nt$. Вероятность же dm прохождения в интервале прицельных расстояний от p до $p + dp$ будет равна

$$dm = 2\pi pnt \cdot dp = (\pi/4)ntb^2 c \operatorname{tg}(\phi/2) \operatorname{cosec}^2(\phi/2) d\phi, \quad (2)$$

так как $c \operatorname{tg}(\phi/2) = 2p/b$. Значение dm показывает, какая часть всех частиц отклоняется на углы, лежащие в пределах между ϕ и $\phi + d\phi$.

Часть ρ всех частиц, отклоняющихся на углы, превышающие ϕ , дается выражением

$$\rho = (\pi/4)ntb^2 c \operatorname{tg}^2(\phi/2). \quad (3)$$

Часть ρ всех частиц, отклоняющихся на углы в пределах от ϕ_1 до ϕ_2 задается как

$$\rho = (\pi/4)ntb^2 \left[c \operatorname{tg}^2(\phi_1/2) - c \operatorname{tg}^2(\phi_2/2) \right]. \quad (4)$$

Для сопоставления с экспериментальными данными удобно представить уравнение (2) в другом виде. В случае α -лучей на постоянной площади экрана из сернистого цинка отсчитывается число сцинтилляций при различных углах относительно направления падающих частиц. Пусть r — расстояние точки Экрана от точки падения α -луча на рассеивающий материал, тогда если Q — общее число частиц, падающих на рассеивающий материал, то число u α -частиц, отклоненных на угол ϕ и падающих на единицу площади, будет равно

$$y = Qdm / 2\pi r^2 \sin \phi d\phi = (ntb^2 Q \operatorname{cosec}^4 \phi / 2) / 16r^2. \quad (5)$$

Так как $b = 2NeE / mu^2$, то последнее уравнение показывает, что число α -частиц (сцинтилляций), приходящихся на единицу площади экрана из сернистого цинка на данном расстоянии r от точки падения лучей, пропорционально следующим величинам: 1) $\operatorname{cosec}^4 \phi / 2$, или, если ϕ мало, — $1/\phi^4$; 2) толщине рассеивающего материала t при условии, что она мала; 3) величине центрального заряда Ne ; 4) обратной величине $(mu^2)^2$ или обратной величине четвертой степени скорости, если масса постоянна. В этих вычислениях предполагается, что рассеяние α -частиц на большие углы происходит в результате только однократного большого отклонения каждой частицы. Для этого необходимо, чтобы толщина рассеивающего материала была настолько малой, что вероятность второго столкновения, вызывающего новое большое отклонение, является ничтожно малой. Например, если вероятность однократного отклонения ϕ при прохождении толщины t составляет $1/1000$, то вероятность двух последовательных отклонений, каждый раз на угол ϕ , составляет лишь $1/10^6$, т. е. пренебрежимо мала...

П. 2. МАКС ПЛАНК О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В НОРМАЛЬНОМ СПЕКТРЕ

Max Planck

Annalen der Physik, 1901, Vol. 4, p. 553.

On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum

(М. Планк. Избранные труды. М.: Наука, 1975)

1. ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНТРОПИИ РЕЗОНАТОРА КАК ФУНКЦИИ ЕГО ЭНЕРГИИ

§ 1. ...Постоянная энергия U отдельного стационарно вибрирующего резонатора должна рассматриваться как усредненная по времени величина, или, что то же самое, как одновременная средняя энергий большого числа N одинаковых резонаторов, находящихся в том же самом стационарном поле излучения, и которые достаточно разделены, чтобы не влиять прямо друг на друга... Тогда общей энергии $U_N = NU$ такой системы N резонаторов соответствует определенная общая энтропия $S_N = NS$ той же системы, где S представляет среднюю энтропию отдельного резонатора, а энтропия S_N зависит от беспорядка, с которым общая энергия U_N распределена между отдельными резонаторами.

§ 2. Предположим, что энтропия системы S_N пропорциональна логарифму ее вероятности W с произвольной аддитивной постоянной того, что N резонаторов вместе имеют энергию U_N : $S_N = k \log W + \text{const}$.

По моему мнению, это соотношение действительно служит как определение вероятности W , так как в основных предположениях электромагнитной теории нет определенных оснований для такой вероятности. Целесообразность этого выражения очевидна с самого начала из-за его простоты и тесной связи с теоремой из кинетической теории газов (*L. Boltzmann*, Proc. Imper. Acad. Sci., Vienna, (II), 76(1877), p. 428).

§ 3. Определим теперь вероятность W того, что N резонаторов вместе обладают общей колебательной энергией U_N . Для этого необходимо рассматривать энергию U_N не как непрерывную, неограниченно делимую величину, но как дискретную величину, состоящую из целого числа конечных равных частей. Назовем такую часть элементом энергии ϵ . Следовательно, мы должны положить $U_N = P\epsilon$, где P — целое, в общем случае большое число, в то время, как величину ϵ еще надо установить. Очевидно, что всякое распределение P элементов энергии среди N резонаторов может быть только конечным, целым, определенным числом. Каждую та-

кую форму распределения вслед за Больцманом мы будем называть «комплексией»... Для ясности мы должны заметить, что две комплексии должны рассматриваться как различные, если соответствующие числовые последовательности содержат те же самые числа, но в различном порядке. Из комбинаторики можно получить число всех возможных комплексий:

$$R = \frac{N(N+1)(N+2)\cdots(N+P-1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots P} = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}.$$

По теореме Стирлинга мы имеем в первом приближении $N! = N^N$.

$$\text{Следовательно, } R = \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P}.$$

§ 4. Гипотеза, которую мы хотим установить как основу для дальнейших вычислений, состоит в следующем: для того, чтобы N резонаторов обладали коллективно колебательной энергией U_N , вероятность W должна быть пропорциональна числу всех возможных комплексий R , образованных распределением энергии U_N среди N резонаторов; или другими словами, любая данная комплексия так же вероятна, как и любая другая. Какая из них действительно реализуется, можно обнаружить только в опыте...

§ 5. Согласно гипотезе энтропия рассматриваемой системы после соответствующего определения аддитивной постоянной равна

$$S_N = k \log R = k \{ (N+P) \log(N+P) - N \log N - P \log P \}$$

или, комбинируя вышеприведенные формулы,

$$S_N = kN \{ (1+U/\varepsilon) \log(1+U/\varepsilon) - (U/\varepsilon) \log(U/\varepsilon) \}.$$

Таким образом, энтропия отдельного резонатора как функция его энергии определяется выражением

$$S = k \{ (1+U/\varepsilon) \log(1+U/\varepsilon) - (U/\varepsilon) \log(U/\varepsilon) \}. \quad (6)$$

II. ВВЕДЕНИЕ ЗАКОНА СМЕЩЕНИЯ ВИНА

§ 6. ...Закон смещения Вина... используется в форме $E \cdot d\lambda = \theta^5 \psi(\lambda\theta) \cdot d\lambda$, где λ - длина волны, $E d\lambda$ представляет объемную плотность излучения черного тела в спектральном интервале от λ до $\lambda + d\lambda$, θ - температура, $\psi(x)$ - некоторая функция, зависящая только от аргумента x .

§ 7. ...Рассматривая далее только монохроматическое излучение, введем частоту ν вместо длины волны. Обозначим через $u d\nu$ объемную плотность энергии излучения в спектральном диапазоне от ν до $\nu + d\nu$. Тогда запишем: $u d\nu$ вместо $E d\lambda$; c/ν вместо λ и $c d\nu/\nu^2$ вместо $d\lambda$. После этого

мы получим $u = \theta^5 \frac{c}{v^2} \psi(c\theta/v)$. Далее, согласно хорошо известному закону Кирхгофа—Клаузиуса, энергия, испускаемая в единицу времени на частоте ν при температуре θ с черной поверхности в теплопроводящей среде, обратно пропорциональна квадрату скорости распространения c^2 . Следовательно, плотность энергии обратно пропорциональна c^3 , и мы имеем: $u = (\theta^5/v^2 c^3) \cdot f(\theta/\nu)$, где константы, связанные с функцией f , не зависят от c . Тогда, вводя новую функцию \bar{f} , мы можем написать

$$u = (\nu^3/c^3) \cdot f(\theta/\nu). \quad (7)$$

Отсюда видно среди всего прочего, что, как хорошо известно, излучаемая энергия $u \cdot \lambda^3$ при данной температуре и частоте одинакова для всех теплопроводящих сред.

§ 8. Чтобы перейти от плотности энергии u к энергии U стационарного резонатора, находящегося в поле излучения и колеблющегося с той же частотой ν , мы используем уравнение (34) моей работы по необратимым процессам излучения (*M. Planck. Ann. Phys.*, 1900, Bd. 2, S. 202–204): $K = \nu^2 U/c^2$, где K — интенсивность монохроматического линейно-поляризованного луча. Вместе с хорошо известным уравнением $u = 8\pi K/c$ это дает

$$u = 8\pi \nu^2 U/c^3. \quad (8)$$

Отсюда и из уравнения (7) следует: $U = \nu \cdot f(\theta/\nu)$, где c не появляется совсем. Поэтому мы можем написать $\theta = \nu \cdot f(U/\nu)$.

§ 9. Наконец, мы можем ввести энтропию резонатора S , полагая

$$\frac{1}{\theta} = \frac{dS}{dU}. \quad (9)$$

Мы тогда получаем $\frac{dS}{dU} = \frac{1}{\nu} \cdot f\left(\frac{U}{\nu}\right)$ или интегрируя

$$S = f(U/\nu). \quad (10)$$

Таким образом, энтропия резонатора, колеблющегося в произвольной теплопроводящей среде, зависит только от переменной U/ν и содержит только универсальные постоянные. Это есть простейшая форма закона смещения Вина, насколько мне известно.

§ 10. Если мы приложим закон смещения Вина в последней форме к уравнению (6) для энтропии, то мы найдем тогда, что элемент энергии должен быть пропорционален частоте, т. е.

$$\varepsilon = h\nu$$

и, следовательно,

$$S = k \left\{ (1 + U/h\nu) \log(1 + U/h\nu) - (U/h\nu) \log(U/h\nu) \right\}.$$

Здесь h и k — универсальные постоянные. При подстановке в уравнение (9) получаем

$$\frac{1}{\theta} = \frac{k}{h\nu} \log \left(1 + \frac{h\nu}{U} \right),$$

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k\theta} - 1}. \quad (11)$$

Тогда из уравнения (8) следует искомый закон распределения энергии:

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k\theta} - 1}, \quad (12)$$

или вводя подстановки, данные в § 7, в терминах длины волны вместо частоты:

$$E = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/k\lambda\theta} - 1} \dots \quad (13)$$

III. ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

§ 11. Значения обеих универсальных постоянных h и k можно вычислить довольно точно с помощью имеющихся опытных данных. Курлбаум, обозначая общую энергию, излучаемую в воздух с 1 кв. см черного тела при температуре $t^\circ\text{C}$ за 1 с через S_t , нашел, что

$$3 S_{100} - S_0 = 0.0731 \text{ Вт} / \text{см}^2 = 7.31 \cdot 10^5 \text{ эрг} / \text{см}^2 \cdot \text{с}.$$

Из этого можно получить плотность энергии общего излучения в воздух при абсолютной температуре 1:

$$\frac{4 \cdot 7.31 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{10} (373^4 - 273^4)} = 7.061 \cdot 10^{-15} \text{ эрг} / \text{см}^3 \cdot \text{град}^4.$$

С другой стороны, согласно уравнению (12) плотность энергии общей энергии излучения для $\theta=1$ равна

$$u^* = \int_0^\infty u d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/k} - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \nu^3 (e^{-h\nu/k} + e^{-2h\nu/k} + e^{-3h\nu/k} + \dots) d\nu$$

и с помощью почленного интегрирования

$$u^* = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot 6 \left(\frac{k}{h}\right)^4 \left(1 + \frac{1}{24} + \frac{1}{34} + \frac{1}{44} + \dots\right) = \frac{48\pi k^4}{c^3 h^3} \cdot 1.0823.$$

Если мы положим это равным $7.061 \cdot 10^{-15}$, то, поскольку $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, получим

$$k^4 / h^3 = 1.1682 \cdot 10^{15}. \quad (14)$$

§ 12. Люммер и Прингсхейм определили, что произведение $\lambda_m \cdot \theta$, где λ_m — длина волны максимальной энергии в воздухе при температуре θ , должно быть равно 2940 *микрон·град*. Таким образом, в абсолютных единицах

$$\lambda_m = 0.294 \text{ см} \cdot \text{град}.$$

С другой стороны, из уравнения (13) после дифференцирования E по θ и приравнивания производной нулю, можно найти $\lambda = \lambda_m$:

$$(1 - ch/5k\lambda_m\theta) \cdot e^{ch/k\lambda_m\theta} = 1.$$

Из этого трансцендентного уравнения

$$\lambda_m \cdot \theta = c h / 4.965 k.$$

Следовательно

$$h/k = (4.9561 \cdot 0.294) / 3 \cdot 10^{10} = 4.866 \cdot 10^{-11}.$$

Отсюда и из уравнения (14) следуют значения для универсальных констант:

$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с},$$

$$k = 1.346 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}.$$

Это те самые числа, которые я указывал в моем предыдущем сообщении.

П. 3. НИЛЬС БОР

О СТРОЕНИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Niels Bohr

Philosophical Magazine, 1913, Series 6, Vol. 26, p. 1–25

(Н. Бор. Избранные научные труды, Т. 1, 2. М.: Наука, 1970)

Чтобы объяснить результаты экспериментов по рассеянию α -лучей веществом, профессор Резерфорд дал теорию структуры атомов. Согласно этой теории атомы состоят из положительно заряженных ядер, окруженных системой электронов, удерживаемых силами притяжения ядер; общий отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядер. Далее, предполагается, что ядра содержат существенную часть массы атома и их линейные размеры намного меньше линейных размеров всего атома... При попытке объяснить некоторые свойства вещества на основе этой атомной модели мы встречаемся однако с серьезными трудностями, вызванными очевидной нестабильностью системы электронов... Принципиальное отличие между атомными моделями, предложенными Томсоном и Резерфордом, состоит в силах, действующих на электроны в атоме — модель Томсона допускает определенные конфигурации и движения электронов, для которых система находится в устойчивом равновесии, такие конфигурации однако не существуют во второй атомной модели. Суть различия возможно будет более ясна, если заметить, что среди величин, характеризующих первый атом, появляется величина — радиус положительной сферы того же порядка величины, как линейные размеры атома, тогда как такая длина не появляется среди величин, характеризующих второй атом, таких как заряды и массы электронов и положительных ядер или только комбинаций этих величин. Путь рассмотрения проблемы такого рода последние годы претерпел существенные изменения благодаря развитию теории излучения энергии и прямому подтверждению новых предположений, введенных в этой теории, в экспериментах в разных явлениях, таких как теплоемкость, фотоэлектрический эффект, Рентген и т. д. Результат дискуссии этих вопросов в общем приводит к признанию неадекватности классической электродинамики при описании поведения систем атомных размеров. Каково бы ни было изменение законов движения электронов, кажется необходимым ввести в законы величину, чуждую классической электродинамике, т. е. постоянную Планка, или как ее часто называют, элементарный квант действия. С введением этой величины вопрос об устойчивой конфигурации электронов в атомах существенно изменяется, поскольку эта константа имеет такую размерность и величину, что она вместе с массой и зарядом частиц может определить длину порядка требуемой величины...

Эта статья является попыткой показать, что приложение отмеченных выше идей к атомной модели Резерфорда составляет основу теории структуры атомов...

Часть I — СВЯЗЫВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ ЯДРАМИ

§ 1. Общее рассмотрение

Неадекватность классической электродинамики в применении к свойствам атомов в модели Резерфорда особенно ясна, если мы рассмотрим простую систему, состоящую из положительно заряженного ядра очень малых размеров и электрона, описывающего замкнутую орбиту вокруг него. Для простоты предположим, что масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой ядра, и что скорость электрона мала по сравнению со скоростью света. Предположим сначала, что энергия излучения отсутствует. В этом случае электрон будет описывать стационарные эллиптические орбиты. Частота обращения ω и главная ось орбиты $2a$ будут зависеть от количества энергии W , которую надо сообщить системе, чтобы удалить электрон на бесконечно большое расстояние от ядра. Обозначая заряд электрона и ядра, соответственно, — e и E , а массу электрона — m , мы получаем

$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{3/2}}{eE\sqrt{m}}, \quad 2a = \frac{eE}{W}. \quad (1)$$

Далее, легко показать, что среднее значение кинетической энергии электрона за период обращения равно W . Мы видим, что если значение W не задано, то не заданы значения величин ω и a , характеризующих рассматриваемую систему. Учтем, однако, теперь энергию излучения, вычисляя ее обычным образом из ускорения электрона. В этом случае электрон не будет больше описывать стационарные орбиты. Энергия W будет непрерывно расти, а электрон будет приближаться к ядру, описывая орбиты все меньшего и меньшего размера и с большей и большей частотой; электрон в среднем запасает кинетическую энергию, в то время как вся система энергию теряет. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, когда размеры орбиты сравняются с размерами электрона или ядра. Простое вычисление показывает, что излучаемая энергия в рассматриваемом процессе аномально велика по сравнению с энергией, излучаемой в обычных молекулярных процессах...

Очевидно, что поведение такой системы будет сильно отличаться от поведения атомной системы, существующей в природе. Прежде всего, реальные атомы в их постоянном состоянии имеют абсолютно фиксированные размеры и частоты. Далее, если мы рассматриваем некоторый молекулярный процесс, то результат всегда оказывается такой, что после получения определенного количества энергии происходит излучение энергии,

так что система оказывается вновь в устойчивом состоянии равновесия, в котором расстояния между частицами имеют тот же порядок величины, как и до процесса.

Теперь существенный пункт в теории излучения Планка состоит в том, что энергия излучения от атомной системы изменяется не непрерывно, как предполагается в обычной электродинамике, а, напротив, количество энергии, излучаемой атомным вибратором частоты ν при отдельном излучении, равно $\tau h\nu$, τ — целое число, h — универсальная постоянная.

Возвращаясь к рассмотренному выше простому случаю одного электрона и одного положительного заряженного ядра, мы допустим, что электрон в начале взаимодействия с ядром находится далеко от ядра и не обладает относительно него заметной скоростью. Допустим далее, что после встречи с ядром электрон попадает на стационарную орбиту вокруг ядра. По причинам, которые выяснятся позже, мы примем, что орбита, о которой идет речь, круговая. Это допущение не вызовет изменений для систем, содержащих только один электрон.

Теперь допустим, что электрон испускает монохроматическое излучение с частотой ν , равной половине частоты обращения электрона на своей окончательной орбите. Тогда, согласно теории Планка, можно ожидать, что количество энергии, испускаемой в этом процессе, равно $\tau h\nu$, где h — постоянная Планка, а τ — целое число. Если допустить, что излучение монохроматично, то само собой напрашивается второе допущение относительно частоты излучения, а именно, число оборотов электрона в начале излучения равно нулю. Вопрос о строгости обоих допущений и применимости теории Планка будет подробнее рассмотрен в § 3. Положив

$$W = \tau h\omega / 2, \quad (2)$$

с помощью формулы (1) мы получим

$$W = \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^2 h^2}, \quad \omega = \frac{4\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^3 h^3}, \quad 2a = \frac{\tau^2 h^2}{2\pi^2 m e E}. \quad (3)$$

Если в этих выражениях придать τ разные значения, получим ряд значений W , ω и a , соответствующих ряду конфигураций системы. Согласно предыдущим рассуждениям мы приходим к выводу, что эти конфигурации соответствуют состояниям системы, в которых нет излучения энергии, а потому они будут стационарными, пока система не будет возмущена извне. Мы видим, что значение W максимально, когда τ получает наименьшее значение, равное единице. Этот случай будет соответствовать наиболее устойчивому состоянию системы, т. е. будет соответствовать той связи электрона, для разрыва которой приходится затрачивать наибольшее количество энергии.

Если подставить названные выше значения $\tau = 1$ и $e = E$ и экспериментальные значения

$$e = 4,7 \cdot 10^{-10}, \quad e/m = 5,31 \cdot 10^{17}, \quad h = 6,5 \cdot 10^{-27},$$

то получим

$$2a = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}, \quad \omega = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}, \quad W/e = 13B.$$

Мы видим, что эти величины того же порядка, что и минимальные размеры атома, оптические частоты и ионизационные потенциалы...

Системы, подобные рассматриваемым в настоящей работе, у которых силы взаимодействия между частицами меняются обратно пропорционально квадрату расстояния, обсуждались с точки зрения теории Планка Никольсоном (*J. W. Nicholson. Month. Not. Roy. Astr. Soc. 1912, 72, 49, 139, 677, 693, 729*). В ряде работ он показал, что неизвестное до сих пор происхождение линий в спектре туманностей и солнечной короны представляется возможным объяснить, если допустить наличие в этих телах определенных гипотетических элементов с точно указанными свойствами. Атомы этих элементов должны состоять из кольца с небольшим числом электронов, окружающих положительное ядро исчезающе малых размеров. Соотношения между частотами, соответствующими указанным линиям, сравнимы с соотношениями между частотами, соответствующими различного рода колебаниям электронного кольца. Никольсон указал на связь с теорией Планка, показав, что соотношения длин волн различных групп линий в спектре солнечной короны можно с большой точностью передать, если принять, что отношение энергии системы к числу оборотов кольца равно целому кратному постоянной Планка. Величина, которую Никольсон принял за энергию, в два раза больше той, которую мы выше обозначили через W ...

Казалось бы, что исключительно хорошее соответствие между вычисленными и наблюдаемыми значениями отношения соответствующих длин волн является сильным аргументом в пользу правильности основ расчетов Никольсона. Но против его теории можно выдвинуть серьезные возражения. Эти возражения тесно связаны с проблемой однородности излучения. Поскольку применяется теория Планка, мы можем ожидать, что излучение испускается квантами. Но системы, подобные рассматриваемым здесь, у которых частота является функцией энергии, не в состоянии испускать конечное количество монохроматического излучения, ибо по мере излучения меняется энергия системы, а следовательно и частота. Кроме того, по расчетам Никольсона, системы неустойчивы для некоторых видов колебаний. Отвлекаясь от этих возражений, которые могут быть только формальными, нужно отметить, что в такой форме теория представляется неспособной объяснить известные законы Бальмера и Ритца, охватываю-

щие частоты линий в спектрах обычных элементов. Мы попытаемся показать, что упомянутые трудности исчезают, если рассматривать вопрос с точки зрения, принятой в настоящей работе. Прежде чем перейти к изложению теории, совершенно необходимо еще раз привести рассуждения, характеризующие расчеты (*формулы* (2), (3)). Основные допущения ее следующие.

1. Динамическое равновесие системы в стационарном состоянии можно рассматривать с помощью обычной механики, тогда как переход системы из одного стационарного состояния в другое нельзя трактовать на этой основе.
2. Указанный переход сопровождается испусканием *монохроматического* излучения, для которого соотношение между частотой и количеством выделенной энергии именно такое, которое дает теория Планка.

Первое допущение напрашивается само собой, поскольку известно, что при расчете движения электронов обычная механика теряет свою абсолютную применимость, и справедлива только для средних значений. С другой стороны, при расчетах динамического равновесия в стационарном состоянии, в котором нет относительных смещений частиц, нет необходимости различать действительные движения и средние. Второе допущение находится в явном противоречии с общепринятым пониманием электродинамики, но представляется необходимым для объяснения экспериментальных фактов. В расчетах мы применили, кроме того, более специальное допущение, а именно допущение, что различным стационарным состояниям соответствует испускание различного числа планковских квантов энергии и что частота излучения, испускаемого при переходе системы из состояния, в котором энергия еще не излучалась, в одно из стационарных состояний, равно половине частоты обращения электрона в последнем состоянии. Однако мы можем (см. § 3) получить соотношения (3) для стационарных состояний, применяя предположения несколько другого вида. Пока мы отложим рассмотрение специальных предположений и сначала покажем, как можно объяснить линейчатые спектры водорода для стационарных состояний с помощью упомянутых выше основных допущений и соотношений (3).

§ 2. Испускание линейчатых спектров

Спектр водорода. Вся совокупность опытных данных указывает на то, что атом водорода состоит просто из единственного электрона, вращающегося вокруг положительного ядра с зарядом e ... Восстановление атома водорода, после того как электрон был удален, — например, при электрическом разряде в вакуумной трубке, — соответствует рассмотренному выше связыванию одного электрона положительным ядром. Если в соотношениях (3) положить $E = e$, мы получим для общего количества энергии, излученной при образовании стационарного состояния,

$$W_{\tau} = \frac{2\pi^2 m e^4}{\tau^2 h^2}.$$

Количество энергии, испускаемой при переходе системы из состояния, соответствующего $\tau = \tau_1$, в другое, где $\tau = \tau_2$, будет

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right).$$

Предполагая теперь, что рассматриваемое излучение монохроматично, и что количество испускаемой энергии равно $h\nu$, где ν — частота излучения, получаем

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu,$$

и отсюда

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right). \quad (4)$$

Мы видим, что эти соотношения объясняют закономерность, связывающую линии спектра водорода. Если взять $\tau_2 = 2$ и варьировать τ_1 , получим обычную серию Бальмера. Если взять $\tau_2 = 3$, получим в инфракрасной области серию, которую наблюдал Пашен (*F. Paschen. Ann. d. Phys.* 1908, 27, 565) и еще раньше предсказал Ритц. При $\tau_2 = 1$ и $\tau_2 = 4, 5$ получим в крайней ультрафиолетовой и, соответственно, крайней инфракрасной областях серии, которые еще не наблюдались, но существование которых можно предположить. Соответствие здесь как качественное, так и количественное. Если положить

$$e = 4,7 \cdot 10^{-10}, \quad e/m = 5,31 \cdot 10^{17}, \quad h = 6,5 \cdot 10^{-27},$$

то получим

$$\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} = 3,1 \cdot 10^{15}.$$

Эмпирическое значение сомножителя вне скобок в формуле (4) равно $3,290 \cdot 10^{15}$. Соответствие между теоретическим и наблюдаемым значениями лежит в пределах ошибок измерений постоянных, входящих в теоретическую формулу. В § 3 мы еще вернемся к рассмотрению этого соответствия...

...Можно заметить, что указанным способом нельзя получить другие серии, которые обычно приписываются водороду, например, серию, кото-

рую впервые наблюдал Пикеринг (*E. C. Pickering*, *Astrophys. Journ.* 1896, 4, 369; 1897, 5, 2) в спектре звезды ζ Кормы, и группу серий, недавно найденных Фаулером (*A. Fowler*, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 1912, Dec. 73) при исследовании смеси водорода и гелия в вакуумных трубках. Мы увидим, однако, что с помощью описанной выше теории можно естественным образом объяснить эти серии, если приписать их гелию...

Спектры других элементов. Для систем, содержащих большее число электронов, мы должны в соответствии с результатами опыта ожидать существования в линейчатых спектрах более сложных закономерностей, чем для рассмотренных до сих пор...

...По теории Ридберга, обобщенной Ритцем (*W. Ritz*, *Phys. Zs.* 1908, 9, 521) частота, соответствующая линии какого-либо элемента, может быть представлена выражением

$$\nu = F_r(\tau_1) - F_s(\tau_2),$$

где τ_1 и τ_2 — целые числа, а F_1, F_2, F_3, \dots — функции τ вида

$$\frac{K}{(\tau + \alpha_1)^2}, \frac{K}{(\tau + \alpha_2)^2}, \dots$$

K — универсальная постоянная, равная стоящему вне скобок множителю в формуле (4) для спектра водорода...

§ 3. Общие соображения. Продолжение

...Хотя, естественно, не может быть и речи о механическом обосновании приведенных в этой работе расчетов, тем не менее, можно дать очень простую интерпретацию расчетов с помощью понятий обычной механики. Если через M обозначить момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, то для круговой орбиты сразу имеем $\pi M = T / \omega$, где ω — частота обращения, а T — кинетическая энергия электрона. Для круговой орбиты $T = W$, а, следовательно, из формулы (2) получаем $M = \tau M_0$, где $M_0 = h / 2\pi = 1,04 \cdot 10^{-27}$.

Если принять, что электрон в стационарном состоянии движется по круговой орбите, то результат расчета может быть выражен простым требованием: в стационарном состоянии системы момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, равняется целому кратному некоторой универсальной величины независимо от заряда ядра. Возможную значимость момента импульса для рассмотрения атомной системы по теории Планка особенно подчеркивал Никольсон.

Большое количество различных стационарных состояний наблюдается только при исследовании поглощения и испускании излучения. В большинстве других физических явлений атомы вещества находятся только в

одном определенном состоянии, а именно в состоянии при низкой температуре. Из всего сказанного мы непосредственно приходим к выводу, что «основному» состоянию соответствует то из стационарных состояний, при образовании которого было испущено наибольшее количество энергии. Согласно формулам (3) это то состояние, для которого $\tau = 1$.

§ 4. Поглощение излучения

Чтобы удовлетворить закону Кирхгофа, необходимо ввести такие предположения о механизме поглощения излучения, которые соответствовали бы используемым при рассмотрении испускания. Так, мы должны предположить, что система, состоящая из ядра и вращающегося вокруг него электрона, при определенных условиях может поглощать излучение, частота которого равна частоте монохроматического излучения, испускаемого при переходе системы между стационарными состояниями. Рассмотрим испускание излучения при переходе системы между двумя стационарными состояниями A_1 и A_2 , которым соответствуют значения τ , равные τ_1 и τ_2 , где $\tau_1 > \tau_2$. Подобно тому, как необходимым условием испускания рассматриваемого излучения было пребывание системы в состоянии A_1 , мы должны допустить, что необходимым условием поглощения излучения является пребывание системы в состоянии A_2 ...

§ 5. Основное состояние атомной системы

...При переходе к рассмотрению систем с более сложными свойствами мы воспользуемся следующей легко доказуемой теоремой:

В любой системе, состоящей из покоящегося ядра и электронов, движущихся по круговым орбитам со скоростью, малыми по сравнению со скоростью света, кинетическая энергия численно равна половине потенциальной...

...В любой молекулярной системе, состоящей из положительно заряженных ядер и электронов, где ядра находятся в покое друг относительно друга, а электроны движутся по круговым орбитам, момент импульса относительно центра орбиты для каждого электрона в основном состоянии системы будет равняться $h/2\pi$...

Заключительные замечания

В настоящей работе была сделана попытка развить теорию строения атомов и молекул на основе представлений, введенных Планком для расчета излучения черного тела, и теории строения атома, предложенной Резерфордом для объяснения рассеяния α -частиц веществом.

Теория Планка рассматривает испускание и поглощение излучения атомным вибратором постоянной частоты независимо от энергии, которой обладают системы в рассматриваемый момент. Но предположение о таком

вibrаторе включает предположение о квазиупругих силах, и несовместимо с теорией Резерфорда, согласно которой все силы, действующие между частицами в атомной системе, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Поэтому, чтобы иметь возможность использовать основные результаты Планка, необходимо вводить новые предположения об испускании и поглощении излучения атомными системами.

В настоящей работе вводятся следующие основные предположения.

1. Испускание (или поглощение) энергии происходит не непрерывно, как это принимается в обычной электродинамике, а только при переходе системы из одного «стационарного» состояния в другое.
2. Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях определяется обычными законами механики, тогда как для перехода системы между различными стационарными состояниями эти законы недействительны.
3. Испускаемое при переходе системы из одного стационарного состояния в другое излучение монохроматично, и соотношение между частотой ν и общим количеством излученной энергии E дается равенством $E = h\nu$, где h — постоянная Планка.
4. Различные стационарные состояния простой системы, состоящей из вращающегося вокруг положительного ядра электрона, определяются из условия, что отношение между общей энергией, испущенной при образовании данной конфигурации, и числом оборотов электронов является целым кратным $h/2$. Предположение о том, что орбита электронов круговая равнозначно требованию, чтобы момент импульса вращающегося вокруг ядра электрона был бы целым кратным $h/2\pi$.
5. «Основное» состояние любой атомной системы, т. е. состояние, при котором излученная энергия максимальна, определяется из условия, чтобы момент импульса каждого электрона относительно центра его орбиты равнялся $h/2\pi$...

Другие книги нашего издательства:



URSS

Серия «Классики науки»

Ньютон И. Математические начала натуральной философии.

Гейзенберг В. Избранные труды.

Смординский Я. А. Избранные труды.

Тодхантер И. История математических теорий притяжения и фигуры Земли.

Серия «Классический университетский учебник»

Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П. Частицы и атомные ядра.

Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. В 4 т.

Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии.

Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений.

Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей.

Колмогоров А. Н., Драгалин А. Г. Математическая логика.

Серия «Физико-математическое наследие: физика»

Ван дер Варден Б. Л. Метод теории групп в квантовой механике.

Грин Х. Матричная квантовая механика.

Флюгге З. Задачи по квантовой механике. В 2 т.

Дирак П. А. М. Лекции по квантовой теории поля.

Карно С., Клаузиус Р., Томсон У. (лорд Кельвин) и др. Второе начало термодинамики.

Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология.

Шварцшильд М. Строение и эволюция звезд.

Вебстер А. Г. Механика материальных точек, твердых, упругих и жидких тел. В 2 т.

Виляя Г. Теория вихрей.

Серия «НАУКУ — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы»

Гарднер М. Теория относительности для миллионов.

Перельман Я. И. Занимательная астрономия.

Сазанов А. А. Четырехмерная модель мира по Минковскому.

Хвальсон О. Д. Теория относительности А. Эйнштейна и новое миропонимание.

Кононович Э. В. Солнце — дневная звезда.

Липунов В. М. В мире двойных звезд.

Тарасов Л. В., Тарасова А. Н. Беседы о преломлении света.

Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны.

Каганов М. И., Цукерник В. М. Природа магнетизма.

Колмогоров А. Н. Математика — наука и профессия.

Мизес Р. Вероятность и статистика.

Стинрод Н., Чинн У. Первые понятия топологии.

Вольберг О. А. Основные идеи проективной геометрии.

Меннхен Ф. Некоторые тайны артистов-вычислителей.

Вильямс Дж. Д. Совершенный стратег, или Букварь по теории стратегических игр.

Харкевич А. А. Автоколебания.

Ашкинази Л. А. Электронные лампы: Из прошлого в будущее.

Шейд К. Опыты по химии для начинающих.

Кац Е. А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры.

Другие книги нашего издательства:



URSS

Квантовая механика

- Фок В. А.* Начала квантовой механики.
Фок В. А. Квантовая физика и строение материи.
Фок В. А. Работы по квантовой теории поля.
Бройль Л. де. Введение в волновую механику.
Кемпфер Ф. Основные положения квантовой механики.
Мотт Н., Снеддон И. Волновая механика и ее применения.
Тарасов Л. В. Основы квантовой механики.
Тарасов Л. В. Введение в квантовую оптику.
Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Козан В. И. Задачи по квантовой механике. В 2 кн.
Горбачевич А. К. Квантовая механика в общей теории относительности.
Килин С. Я. Квантовая оптика: поля и их детектирование.
Вильф Ф. Ж. Логическая структура квантовой механики.
Эддингтон А. Относительность и кванты.
Бауэр Э. Введение в теорию групп и ее приложения к квантовой физике.
Петрашень М. И., Трифонов Е. Д. Применение теории групп в квантовой механике.
Бриллюэн Л. Квантовая статистика.
Хинчин А. Я. Математические основания квантовой статистики.
Стояновский Ж. В. Введение в математические принципы квантовой теории поля.

Физика элементарных частиц

- Капитонов И. М.* Введение в физику ядра и частиц.
Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А. Нуклеосинтез во Вселенной.
Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц.
Окунь Л. Б. Лептоны и кварки.
Бояркин О. М. Введение в физику элементарных частиц.
Бояркин О. М. Физика массивных нейтрино.
Ляховский В. Д., Болохов А. А. Группы симметрии и элементарные частицы.
Бранский В. П. Теория элементарных частиц как объект методологического исследования.
Бранский В. П. Значение релятивистского метода Эйнштейна в формировании общей теории элементарных частиц.

Теория поля и гравитация

- Рубаков В. А.* Классические калибровочные поля. Бозонные теории.
Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Теории с фермионами.
 Некоммутативные теории.
Иваненко Д. Д., Сарданашвили Г. А. Гравитация.
Сарданашвили Г. А. Современные методы теории поля. Т. 1–4.
Коноплева Н. П., Попов В. Н. Калибровочные поля.
Богош А. А. Введение в калибровочную полевую теорию электрослабых взаимодействий.
Богош А. А., Мороз Л. Г. Введение в теорию классических полей.
Прохоров Л. В., Шабанов С. В. Гамильтонова механика калибровочных систем.
Менский М. Б. Группа путей: измерения, поля, частицы.
Визгин В. П. Единые теории поля в квантово-релятивистской революции.

Другие книги нашего издательства:



URSS

Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»

Пенроуз Р. НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ. О компьютерах, мышлении и законах физики. Пер. с англ.

Майнцер К. Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез. Пер. с англ.

Хакен Г. Информация и самоорганизация. Пер. с англ.

Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики.

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Нелинейная динамика и хаос: основные понятия.

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. Нелинейная динамика.

Малинецкий Г. Г. (ред.) Синергетика: Исследования и технологии.

Ариальд В. И. Теория катастроф.

Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса.

Безручко Б. П. и др. Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях.

Данчлов Ю. А. Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение.

Трубецков Д. И. Введение в синергетику. В 2 кн.: Колебания и волны; Хаос и структуры.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Кн. 1, 2.

Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект.

Чернавский Д. С. Синергетика и информация (динамическая теория информации).

Баранцев Р. Г. Синергетика в современном естествознании.

Баранцев Р. Г. и др. Асимптотическая математика и синергетика.

Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел.

Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой.

Тюкин И. Ю., Терехов В. А. Адаптация в нелинейных динамических системах.

Васильков Г. В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем.

Долгоносев Б. М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов.

Пригожин И. Неравновесная статистическая механика.

Пригожин И. От существующего к возникающему.

Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.

Пригожин И., Николс Г. Познание сложного. Введение.

Пригожин И., Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций.

Суздальев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов.

Тел./факс:

(499) 135-42-46,

(499) 135-42-16,

E-mail:

URSS@URSS.ru

<http://URSS.ru>

Наши книги можно приобрести в магазинах:

«Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 625-2457)

«Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)

«Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5001, 780-3370)

«Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)

«Дом книги на Ладужской» (м. Бауманская, ул. Ладужская, 8, стр. 1. Тел. 267-0302)

«Глобус» (м. Университет, 1 г-м. корпус МГУ, комн. 141. Тел. (495) 939-4713)

«У Невтарва» (РГТУ) (м. Новослободская, ул. Чапаева, 15. Тел. (499) 973-4301)

«СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)

Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



URSS

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

- Шредингер Э.* Мой взгляд на мир. Пер. с нем.
- Борн М.* Моя жизнь и взгляды. Пер. с англ.
- Гейзенберг В.* Философские проблемы атомной физики.
- Гейзенберг В.* Часть и целое (беседы вокруг атомной физики).
- Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики: С древнейших времен до конца XVIII века.
- Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики: С начала XIX до середины XX вв.
- Горобец Б. С.* Круг Ландау: Жизнь гения.
- Горобец Б. С.* Круг Ландау: Физика войны и мира.
- Горобец Б. С.* Круг Ландау и Лифшица.
- Горобец Б. С.* Секретные физики из Атомного проекта СССР: Семья Лейпунских.
- Абрамов А. И.* История ядерной физики.
- Богуш А. А.* Очерк по истории физики микромира.
- Хайтун С. Д.* История парадокса Гиббса.
- Бетяев С. К.* Записки гидродинамика.
- Тимошенко С. П.* История науки о сопротивлении материалов.
- Кадомцев С. Б.* Геометрия Лобачевского и физика.
- Владимиров В. И.* Физика ядерных реакторов.
- Кузнецов Б. Г.* Беседы о теории относительности.
- Кузнецов Б. Г.* Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии.
- Кузнецов Б. Г.* История философии для физиков и математиков.
- Кузнецов Б. Г.* Принцип дополнительности.
- Бунге М.* Философия физики.
- Джеммер М.* Понятие массы в классической и современной физике.
- Могилевский Б. М.* Природа глазами физика.
- Новиков А. С.* Научные открытия: Типы, структура, генезис.
- Бриллюэн Л.* Научная неопределенность и информация.
- Рейхенбах Г.* Философия пространства и времени.
- Рейхенбах Г.* Направление времени.
- Уитроу Дж.* Естественная философия времени.
- Грюнбаум А.* Философские проблемы пространства и времени.
- Хаан М. П.* Ненстоящая Вселенная: от Большого взрыва до ускоренного расширения, от кварков до суперструн.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
 тел./факс (499) 135-42-16, 135-42-46
 или электронной почтой URSS@URSS.ru
 Полный каталог изданий представлен
 в интернет-магазине: <http://URSS.ru>

Научная и учебная
литература

Представляем другие книги нашего издательства:



6006 ID 75362

НАУЧНАЯ



Тел./фак
Тел./фак



интернет-магазин
OZON.RU

URSS

e-mail:
IRSS@URSS.ru
аталог изданий
Интернете:

<http://URSS.ru>

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные опечатки присылайте по адресу URSS@URSS.ru. Ваши замечания и предложения будут учтены и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>